

**ESCOLA NAVAL**

**DEPARTAMENTO DE FORMAÇÃO DE MARINHA**



**SISTEMAS DE APOIO À DECISÃO**

**Otimização das derrotas dos navios do tipo corveta**

**Hugo Miguel Gonçalves Freitas**

**MESTRADO EM CIÊNCIAS MILITARES NAVAIS**

**CLASSE DE MARINHA**

**2013**



**ESCOLA NAVAL**

**DEPARTAMENTO DE MARINHA**

**TESE DE MESTRADO EM CIÊNCIAS MILITARES NAVAIS**

***SISTEMAS DE APOIO Á DECISÃO***

***Otimização das derrotas dos navios do tipo corveta***

O Mestrando,

*(assinado no original)*

---

ASPOF Gonçalves Freitas

O Orientador

*(assinado no original)*

---

CTEN Plácido da Conceição

O Coorientador

*(assinado no original)*

---

CFR Abrantes Horta

## EPIGRAFE

*“Some people are weather wise, but most are otherwise”*

*Benjamin Franklin*



## AGRADECIMENTOS

A conclusão desta dissertação não seria possível sem a colaboração de inúmeros intervenientes aos quais gostaria de agradecer.

Em primeiro lugar tenho de agradecer forçosamente aos meus pais e à minha irmã pelo apoio incondicional, empenho e sacrifício ao longo destes anos, sem os quais possivelmente não estaria aqui. Agradeço-lhes ainda o facto de me terem incentivado na escolha deste caminho, depositando desde cedo a confiança que eu necessitava para seguir o meu sonho e alcançar os meus objetivos.

De seguida gostaria de agradecer ao CTEN M Plácido da Conceição pela confiança, o incentivo que me foi depositado, assim como pelo seu esforço na orientação desta dissertação, sem o qual não seria possível levar este navio a bom porto.

Não posso deixar de agradecer ao CFR M Abrantes Horta que me apoiou na escolha do tema e o acompanhou durante o todo o seu processo de desenvolvimento da dissertação.

Agradeço ainda ao CMG ECN Rodrigues Rentróia, da Escola Naval, e ao CFR ECN Rijo Carola, da Direção de Navios, pelo apoio na elaboração da modelação do perfil hidrodinâmico.

Da Direção de Análise e Gestão de Informação agradeço ao ITEN TSN-EIO Gonçalves de Deus pela ajuda e a brevidade, com que me foi prestada, na elaboração do algoritmo, sem a qual a elaboração da aplicação não seria possível.

Agradeço aos camaradas da Escola Naval, em especial ao Curso Padre Fernando Oliveira, por todos os momentos espetaculares passados nestes últimos cinco anos, dentro e fora da Marinha, com os quais aprendi muito não só na componente profissional como também na componente pessoal.

Por fim agradeço a todos os instrutores da Escola Naval assim como toda a sua guarnição pelos conhecimentos e experiências transmitidos.

Deixo ainda o meu desejo das maiores felicidades profissionais e pessoais a todos os acima mencionados.

## RESUMO

Esta dissertação surge da necessidade da Marinha Portuguesa no emprego das unidades navais no cumprimento da sua missão aumentar a eficiência. Dada a atual conjuntura económica do país existe a necessidade de otimizar a utilização dos recursos gastos a bordo dos navios da Armada, nomeadamente o consumo de combustível durante o trânsito no cumprimento das missões atribuídas aos navios. O cálculo das derrotas a serem percorridas pelos navios deverá, considerar as previsões das condições meteo-oceanográficas. O problema consiste na resolução de dois desafios, o primeiro prende-se com a modelação do perfil hidrodinâmico do navio e a sua integração no cálculo, o segundo consiste na criação de um algoritmo para determinar a melhor derrota a ser percorrida pelo navio de modo a que este tenha um consumo estimado mais baixo, sendo que no caso desta dissertação, foi escolhido o algoritmo de Dijkstra. Para a executar este trabalho foi necessário dividi-lo em três fases, uma primeira onde os navios foram expeditamente modelados de modo a obter a ordem de grandeza da reação perante os fatores meteo-oceanográficas s, sendo esta reação traduzida numa perda de velocidade; de seguida desenvolveu-se uma metodologia para obtenção de dados meteo-oceanográficos de forma a permitir o cálculo, uma vez que estes devem de ser obtidos de forma rápida e acessível no mar; por último foi criada uma aplicação que permite o cálculo da derrota ótima com recurso às capacidades computacionais existentes a bordo sendo este validado através da análise e comparação de várias derrotas praticadas por navios.

Palavras-chave: Otimização de derrotas, modelação expedita, perda de velocidade, algoritmo de Dijkstra, fatores meteo-oceanográficas s



## ABSTRACT

This dissertation had its origin in the necessity of Portuguese Navy in the employment of the naval units to fulfil its mission. Given the current country's economic state there is the necessity of optimization of the usage of spent resources on-board ships, more precisely the fuel used during the transits practiced in the fulfilment of missions. Calculation of the routes to be practiced by ships should take in account meteo-oceanographic weather forecasts. The solution to the problem at hand can be divided in two main challenges, the first consists in the modeling of the hydrodynamic characteristics of the ship in weather influence and the integration of that model onto the calculations, the second consists in the creation of an algorithm that determines the optimum route and allows the lowering of the estimated fuel consumption, with that in mind the algorithm chosen was Dijkstra's algorithm. In order to reach a solution it's necessary to divide the problem in three main phases, the first where the ship is modeled in an expedite way allowing the determination of the influence of weather factors in ship speed loss followed by the necessity of weather data that allows not only the calculation but the reception of that data at sea, lastly it is created an application that calculates the optimum route using the computer resources on board the ship, these routes are then validated by the analysis of several routes practiced.

Key words: Route optimization, expedite modeling speed loss Dijkstra's algorithm meteo-oceanographic data



# ÍNDICE GERAL

<b>EPIGRAFE .....</b>	<b>III</b>
<b>AGRADECIMENTOS .....</b>	<b>IV</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>V</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>VI</b>
<b>ÍNDICE GERAL .....</b>	<b>VII</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>IX</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>XII</b>
<b>ÍNDICE DE EQUAÇÕES.....</b>	<b>XIII</b>
<b>LISTA DE ACRÓNIMOS .....</b>	<b>XIV</b>
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1. JUSTIFICAÇÃO DO TEMA.....	7
1.2. PROBLEMÁTICA .....	8
1.3. OBJETIVOS .....	9
1.4. PRESSUPOSTOS .....	10
1.5. METODOLOGIA DA INVESTIGAÇÃO E ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	11
<b>2. O ESTADO DA ARTE .....</b>	<b>14</b>
2.1. A IMPORTÂNCIA DOS COMBUSTÍVEIS PARA A MARINHA E TIPOS DE NAVIOS QUE PODERÃO BENEFICIAR COM OS SERVIÇOS DE ROTEAMENTO.....	16
2.2. TIPOS DE SERVIÇOS ATUALMENTE EXISTENTES.....	20
2.3. TIPOS DE ALGORITMOS EXISTENTES.....	23
<b>3. MODELAÇÃO DO PERFIL DINAMICO DOS NAVIOS .....</b>	<b>30</b>
3.1. RECOLHA DE INFORMAÇÃO .....	34
3.2. ADAPTAÇÃO POSSÍVEL A OUTROS NAVIOS .....	40
3.3. INTEGRAÇÃO DOS DADOS DA MODELAÇÃO DO PERFIL HIDRODINÂMICO DO NAVIO NA APLICAÇÃO.....	41
<b>4. ANÁLISE DOS DADOS METEO-OCEANOGRÁFICAS .....</b>	<b>43</b>
4.1. RECOLHA DE DADOS .....	43
4.2. INTEGRAÇÃO DOS DADOS GRIB NA APLICAÇÃO .....	47
<b>5. NAVEGAÇÃO .....</b>	<b>52</b>
5.1. TIPOS DE DERROTA E A SUA UTILIZAÇÃO .....	53
5.2. CÁLCULOS NÁUTICOS.....	60
<b>6. CALCULADOR DE DERROTA .....</b>	<b>65</b>



6.1.	APLICAÇÃO DOS DADOS.....	65
6.2.	ALGORITMO DE CÁLCULO .....	67
6.3.	RESULTADOS ESPERADOS .....	69
<b>7.</b>	<b>VALIDAÇÃO DA APLICAÇÃO .....</b>	<b>71</b>
7.1.	VALIDAÇÃO DO PERFIL HIDRODINÂMICO .....	73
7.2.	SIMULAÇÃO DAS VIAGENS .....	85
<b>8.</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>93</b>
8.1.	CONCLUSÃO .....	93
8.2.	TRABALHO FUTURO.....	95
<b>9.</b>	<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>97</b>
<b>ANEXOS .....</b>		<b>1</b>
	ANEXO 1 - DEFINIÇÃO DA APLICAÇÃO DOS CRITÉRIOS.....	1
	ANEXO 2 - VELOCIDADES DOS VENTOS NOMINAIS.....	1
	ANEXO 3 – DETERMINAÇÃO DO CENTRÓIDE DA ÁREA VÉLICA .....	1
	ANEXO 4-GRÁFICO CONSUMO/VELOCIDADE DO NRP “BAPTISTA DE ANDRADE” .....	1
	ANEXO 5-GRÁFICO CONSUMO/VELOCIDADE DO NRP “JACINTO CÂNDIDO” .....	1
<b>APÊNDICES .....</b>		<b>1</b>
	APÊNDICE 1- DESENHO DO NAVIO SIMPLIFICADO .....	1
	APÊNDICE 2-DESENHO DO NAVIO SIMPLIFICADO E DIVIDIDO EM FAIXAS LONGITUDINAIS .....	1
	APÊNDICE 3-TABELA RESUMO DO CÁLCULO DA ÀREA DAS FAIXAS DO DESENHO. ....	1
	APÊNDICE 4 - GRÁFICO ÁREA VÉLICA EM RELAÇÃO À MARCAÇÃO .....	1
	APÊNDICE 5 - GRÁFICO PERDA DE VELOCIDADE EM RELAÇÃO À MARCAÇÃO - VENTO.....	1
	APÊNDICE 6-GRÁFICO PERDA DE VELOCIDADE EM RELAÇÃO À MARCAÇÃO - ONDULAÇÃO .....	1
	APÊNDICE 7-ESQUEMA DOS PROCESSOS MAIS IMPORTANTES NA CONSTRUÇÃO DA VARIÁVEL “CUSTOS” .....	1





## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Navio mercante "Cheril C" encalhado no Cabo Carvoeiro .....	6
Figura 2 - Zona SAR Portuguesa ( <a href="http://comandonaval.marinha.pt/PT/mrcc/area/Pages/AreadeResponsabilidade.aspx">http://comandonaval.marinha.pt/PT/mrcc/area/Pages/AreadeResponsabilidade.aspx</a> ) .....	11
Figura 3- Previsão da natureza dos custos do exercício INSTREX 13 .....	17
Figura 4- Custos totais anuais do combustível F76 dos navios da Marinha (COMNAV) ..	18
Figura 5- Consumos anuais F76 na operação dos navios da Marinha (COMNAV) .....	18
Figura 6 - Percentagem de combustível F76 consumido no ano de 2011 na operação dos navios da Marinha (COMNAV) .....	19
Figura 7- Exemplo do cálculo gráfico recorrendo ao algoritmo de Dijkstra.....	24
Figura 8- Exemplo da utilização da "programação dinâmica de Bellman" (Hinnenthal, 2008, p. 5).....	25
Figura 9 - Exemplo do cálculo de uma derrota pelo método isocrónico.....	26
Figura 10- Exemplo da distribuição dos aspetos económicos operacionais de uma frota com o recurso de sistemas de otimização de derrotas (Meijers, 1980) .....	27
Figura 11 - Esquema das resistências internas ao avanço da plataforma .....	31
Figura 12 - Ilustração das forças exercidas no momento de contacto .....	34
Figura 13- Corrida da uma milha (extrato da carta 26407- Sesimbra).....	36
Figura 14 - Exemplificação da colisão da onda na superfície do navio .....	39
Figura 15 - GUI da aplicação com o pop-up menu "velocidade adotada" assinalado.....	42
Figura 16 - Visualização de um ficheiro GRIB carregado através do suplemento READ_GRIB no MATLAB .....	48
Figura 17- Extrato da variável "data_derrota" obtida através da conversão do ficheiro GRIB.....	49
Figura 18- Representação da componente WIND do ficheiro GRIB carregado no MATLAB .....	50
Figura 19 - Esquema resumo do carregamento dos ficheiros GRIB .....	50
Figura 20- Derrota ortodrómica executada entra o PP-ponto de partida) e PC-ponto de chegada (Escola Portuguesa de Pesca, 1989, p. 37) .....	54
Figura 21- Comparação entre derrota loxodrómica e ortodrómica (Escola Portuguesa de Pesca, 1989, p. 39).....	54
Figura 22- Comparação entre uma derrota roteada e uma derrota ortodromia ( <a href="http://www.expeditionmarine.com/">http://www.expeditionmarine.com/</a> ) .....	55



Figura 23 - Comparação entre a derrota loxodrómia e ortodromia (Escola Portuguesa de Pesca, 1989, p. 39).....	56
Figura 24- Representação de ortodromias nas projeções gnomónica e de Mercator (Instituto Hidrográfico, 1989).....	57
Figura 25-Excerto da variável “data_derrota” .....	61
Figura 26- Exemplo de dois vértices e a informação neles contidos, esta encontra-se vertida na variável “data_derrota”. .....	62
Figura 27-Ligação padrão entre um vértice e os vértices adjacentes .....	62
Figura 28- atribuição do valor $\infty$ aos dados dos vértices localizados em terra .....	63
Figura 29 - Esquema resumo do cálculo das distâncias de todos os vértices e marcações .	64
Figura 30 - Esquema resumo do cálculo da variável "Custos".....	65
Figura 31-Processo efetuado pelo algoritmo durante o cálculo da derrota .....	68
Figura 32 - exemplo da utilização da variável "Vis" .....	69
Figura 33 - Viagem BNL – Ponta Delgada do NRP “Baptista de Andrade” recorrendo ao modelo WW3.....	73
Figura 34 - Viagem BNL – Ponta Delgada do NRP “Baptista de Andrade” recorrendo ao modelo GFS.....	74
Figura 35 - Comparação das velocidades simuladas com os registos da viagem BNL – Ponta Delgada do NRP “Batista de Andrade” (WW3) .....	74
Figura 36- Comparação das velocidades simuladas com os registos da viagem BNL – Ponta Delgada do NRP “Baptista de Andrade” (GFS).....	75
Figura 37 - Viagem Ponta Delgada – BNL do NRP “Baptista de Andrade” recorrendo ao modelo WW3.....	76
Figura 38- Comparação das velocidades simuladas com os registos da viagem Ponta Delgada - BNL do NRP “Baptista de Andrade” (WW3) .....	77
Figura 39 - Viagem Ponta Delgada – BNL do NRP “Baptista de Andrade” recorrendo ao modelo GFS.....	77
Figura 40- Comparação das velocidades simuladas com os registos da viagem Ponta Delgada - BNL do NRP “Baptista de Andrade” (GFS) .....	78
Figura 41- Viagem BNL – Ponta Delgada do NRP “Jacinto Cândido” recorrendo ao modelo WW3.....	79
Figura 42- Comparação das velocidades simuladas com os registos da viagem BNL – Ponta Delgada do NRP “Jacinto Cândido” (WW3) .....	80
Figura 43 – Ponta Delgada do NRP “Jacinto Cândido” recorrendo ao modelo GFS.....	80



Figura 44- Comparação das velocidades simuladas com os registos da viagem BNL – Ponta Delgada do NRP “Jacinto Cândido” (GFS) .....	81
Figura 45- Viagem Ponta Delgada – BNL do NRP “Jacinto Cândido” recorrendo ao modelo WW3.....	82
Figura 46- Comparação das velocidades simuladas com os registos da viagem Ponta Delgada – BNL do NRP “Jacinto Cândido” (WW3) .....	83
Figura 47- Viagem Ponta Delgada – BNL do NRP “Jacinto Cândido” recorrendo ao modelo GFS.....	83
Figura 48- Comparação das velocidades simuladas com os registos da viagem Ponta Delgada – BNL do NRP “Jacinto Cândido” (GFS).....	84
Figura 49 - Simulação de uma viagem BNL – Ponta Delgada do NRP “Baptista de Andrade” sendo recorrido ao modelo WW3, Derrotas Ortodrómica e roteada sobrepostas. ....	85
Figura 50- Simulação de uma viagem BNL – Ponta Delgada do NRP “Baptista de Andrade” sendo recorrido ao modelo WW3, derrota loxodromia.....	85
Figura 51 - Simulação de uma viagem BNL – Ponta Delgada do NRP “Baptista de Andrade” sendo recorrido ao modelo GFS, derrota ortodromia .....	86
Figura 52 - Figura 11 - Simulação de uma viagem BNL – Ponta Delgada do NRP “Baptista de Andrade” sendo recorrido ao modelo GFS, derrota roteada.....	87
Figura 53- Figura 11 - Simulação de uma viagem BNL – Ponta Delgada do NRP “Baptista de Andrade” sendo recorrido ao modelo GFS, derrota loxodromia.....	87
Figura 54 - Simulação de uma viagem Ponta Delgada – BNL do NRP “Baptista de Andrade” sendo recorrido ao modelo WW3, derrota loxodromia.....	89
Figura 55-Simulação de uma viagem Ponta Delgada – BNL do NRP “Baptista de Andrade” sendo recorrido ao modelo WW3, derrotas ortodromia e roteada .....	89
Figura 56 - Simulação de uma viagem Ponta Delgada – BNL do NRP “Baptista de Andrade” sendo recorrido ao modelo GFS, derrota roteada sobrepostas.....	90
Figura 57- Simulação de uma viagem Ponta Delgada – BNL do NRP “Jacinto Cândido”(WW3 .....	92
Figura 58 - Simulação de uma viagem Ponta Delgada – BNL do NRP “Jacinto Cândido”(GFS).....	92



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Trocas comerciais externas da EU27 no ano de 2009 por meios de transporte em milhares de milhões de euros (Comissão Europeia, 2011).....	1
Tabela 2 - Trocas comerciais externas da EU27 no ano de 2009 por meios de transporte em milhões de toneladas (Comissão Europeia, 2011).....	2
Tabela 3- Exemplos de atuais fornecedores e serviços de roteamento e previsões meteo-oceanográficas. ....	22
Tabela 4- Tabela explicativa da mensagem de solicitação de ficheiros GRIB à SailDocs (GFS) .....	45
Tabela 5 - Tabela explicativa da mensagem de solicitação de ficheiros GRIB à SailDocs (WW3).....	46
Tabela 6- Período adotado para a vaga dependente da força do vento na escala de Beaufort .....	47
Tabela 7- Vantagens e desvantagens dos tipos de derrotas .....	59
Tabela 8 -Tabela resumo das derrotas utilizadas na simulação de uma viagem BNL – Ponta Delgada do NRP “Baptista de Andrade” sendo recorrido ao modelo WW3 .....	86
Tabela 9 - Tabela resumo das derrotas utilizadas na simulação de uma viagem BNL – Ponta Delgada do NRP “Baptista de Andrade” sendo recorrido ao modelo GFS.....	88
Tabela 10- - Tabela resumo das derrotas utilizadas na simulação de uma viagem BNL – Ponta Delgada do NRP “Baptista de Andrade” sendo recorrido ao modelo WW3 .....	90
Tabela 11 - Tabela resumo das derrotas utilizadas na simulação de uma viagem BNL – Ponta Delgada do NRP “Baptista de Andrade” sendo recorrido ao modelo GFS.....	91



## ÍNDICE DE EQUAÇÕES

Equação 1 - Resistência segundo o método de Froude( (Rawson & Tupper, 2001, p. 395))	
.....	35
Equação 2 - Determinação da pressão em cada uma das faixas ( $P_i$ ).....	37
Equação 3 - Determinação da pressão ( $P_i$ ) quando é desconhecido o coeficiente	
adimensional.....	37
Equação 4 - Segunda lei de Newton.....	38
Equação 5 - Lei fundamental da hidrostática .....	38
Equação 6 - Cálculo da velocidade perdida do navio.....	38
Equação 7 - Lei fundamental da hidrostática para a água .....	39
Equação 8 - Cálculo do consumo de trânsito entre vértices.....	66
Equação 9 - Função objetivo a ser resolvida recorrendo ao algoritmo de Dijkstra.....	67



## LISTA DE ACRÓNIMOS

<b>COAMPS</b>	Coupled Ocean/Atmosphere Mesoscale Prediction System
<b>EU</b>	European Union (União Europeia)
<b>FTP</b>	File transfer protocol
<b>GFS</b>	Global forecast System)
<b>GRIB</b>	Gridded Information in Binary
<b>IMO</b>	International Maritime Organization
<b>MATLAB</b>	Matrix Laboratory
<b>MONICAP</b>	Monotorização continua das atividades da pesca
<b>NCEP</b>	National center for Environmental prediction
<b>NOAA</b>	National oceanic and atmospheric administration
<b>NOGAPS</b>	Navy Operational Global Atmospheric Prediction System
<b>NRP</b>	Navio da Republica Portuguesa
<b>GISIS</b>	Global Integrated Shipping Information System
<b>NTM</b>	Navio de Treino de Mar
<b>ON</b>	Oficial Navegador
<b>OQP</b>	Oficial de quarto à ponte
<b>OSTR</b>	Optimum Ship Track Routing
<b>SADAP</b>	Sistema de apoio á decisão para a atividade de patrulha
<b>SAR</b>	Search and rescue
<b>SOLAS</b>	<i>Safety Of Life At Sea</i>
<b>SPOS</b>	Ship Performance Optimization System



<b>SRR</b>	Safety and rescue region
<b>WMO</b>	World Meteorological Organization
<b>WSI</b>	Weather Services International Inc.
<b>WW3</b>	WaveWatch III



## 1. INTRODUÇÃO

Neste primeiro capítulo é apresentado um enquadramento do problema estudado. É explicado sucintamente o que são os sistemas de otimização de derrotas também conhecidos como sistemas de roteamento, abordadas as estatísticas da *International Maritime Organization* (IMO) assim como alguns acidentes mundialmente conhecidos que poderiam ter sido evitados com a utilização destes serviços. Por forma a facilitar a leitura é ainda exposto a forma como são abordados os restantes capítulos e os resultados provenientes do estudo em questão.

O meio marítimo desde a antiguidade que é utilizado como meio de transporte de grandes quantidades de recursos, envolvendo grandes esforços financeiros e humanos (Evangelos , Harilaos , & Nikolaos , 1992, p. 5). Visualizando as estatísticas das trocas comerciais externas pelos diferentes modos de transporte da União Europeia (EU) de 2009 vertida na Tabela 1 e na Tabela 2, é possível verificar a importância deste meio de transporte.

Tabela 1- Trocas comerciais externas da EU27 no ano de 2009 por meios de transporte em milhares de milhões de euros (Comissão Europeia, 2011)

	Exportações		Importações		Exportações + Importações	
<b>Navegação marítima</b>	513,3	46,8%	604,9	50,4%	1.118,2	48,7%
<b>Rodovias</b>	235,9	21,5%	154,6	12,9%	390,4	17,0%
<b>Ferrovias</b>	17,7	1,6%	12,5	1,0%	30,2	1,3%
<b>Navegação interior</b>	3,2	0,3%	2,3	0,2%	5,5	0,2%
<b>Tubular</b>	3,5	0,3%	81,0	6,8%	84,5	3,7%
<b>Aéreo</b>	289,3	26,4%	220,8	18,4%	510,1	22,2%
<b>Auto propulsionadas</b>	26,1	2,4%	18,3	1,5%	44,4	1,9%
<b>Correio</b>	1,0	0,1%	2,2	0,2%	3,2	0,1%
<b>Desconhecido</b>	7,2	0,7%	103,4	8,6%	110,6	4,8%
<b>Total</b>	<b>1.097,1</b>	<b>100,0%</b>	<b>1.200,0</b>	<b>100,0%</b>	<b>2.297,1</b>	<b>100,0%</b>





## Otimização das rotas dos navios do tipo corveta

Tabela 2 - Trocas comerciais externas da EU27 no ano de 2009 por meios de transporte em milhões de toneladas (Comissão Europeia, 2011)

	Exportações		Importações		Exportações + Importações	
<i>Navegação marítima</i>	385.8	76.8%	1083.3	71.3%	1 469.1	72.7 %
<i>Rodovias</i>	72.4	14.4%	50.1	3.3%	122.5	6.1 %
<i>Ferrovias</i>	18.1	3.6%	51.9	3.4%	70.0	3.5 %
<i>Navegação interior</i>	8.2	1.6%	9.9	0.6%	18.0	0.9 %
<i>Tubular</i>	3.7	0.7%	247.9	16.3%	251.6	12.5 %
<i>Aéreo</i>	9.8	2.0%	3.1	0.2%	12.9	0.6 %
<i>Auto propulsadas</i>	2.0	0.4%	0.8	0.1%	2.8	0.1 %
<i>Correio</i>	0.0	0.0%	0.0	0.0%	0.0	0.0%
<i>Desconhecido</i>	2.0	0.4%	71.8	4.7%	73.8	3.7 %
<b>Total</b>	<b>502.0</b>	<b>100,0%</b>	<b>1 518.7</b>	<b>100,0%</b>	<b>2 020.8</b>	<b>100,0%</b>

De acordo com os dados apresentados na Tabela 2, cerca de 72.7% da carga contendorizada é transportada através do meio marítimo, representando, segundo a Tabela 1, aproximadamente metade das trocas comerciais externas da EU27 em 2009. Neste quadro é criada uma grande pressão por parte dos utilizadores deste meio de transporte na exploração de métodos e procedimentos mais eficientes, sendo dado cada vez mais relevância aos avanços no campo tecnológico. Uma parte destes métodos centra-se atualmente no desenvolvimento de sistemas de apoio à decisão, com o intuito de minimizar os gastos efetuados pelo navio, fundamentando-se em previsões e cenários calculados, de forma fiável e rigorosa.

O transporte de mercadoria no meio marítimo é uma das atividades mais perigosas exercidas na atualidade, devido principalmente ao fator risco/lucro que obriga os comandantes dos navios a optarem por passar por intempéries ou zonas perigosas com o objetivo de cumprirem com as metas planeadas (Evangelos , Harilaos , & Nikolaos , 1992, p. 5). Este risco, por vezes, pode significar a perda parcial ou total de elementos da guarnição, da plataforma ou da carga transportada, resumindo-se á perda de vidas humanas e milhões de euros em prejuízo. Com a utilização dos sistemas de roteamento o nível de risco foi diminuindo tal como a duração da viagem.



O principal objetivo dos sistemas de apoio á decisão é o aumento da eficiência<sup>1</sup> no processo da tomada de decisão, no caso particular dos sistemas de roteamento esta decisão prende-se com a escolha da melhor derrota a ser praticada pelo navio. As grandes companhias de transporte de carga têm apostado neste género de sistemas para aumentar a eficiência na operação das suas frotas. Com a sua utilização conseguem uma redução dos custos do trânsito da frota e a diminuição dos riscos com a navegação em rotas mais seguras, permitindo ainda que seja depositada nestas companhias uma maior confiança por parte dos seus utilizadores.

Os sistemas de roteamento são sistemas de apoio à decisão desenvolvidos para o estudo das viagens, estes estudam várias alternativas, de modo a fornecer a derrota economicamente viável, o mínimo de viagem ou a viagem mais confortável, sendo que alguns destes sistemas podem ainda fornecer derrotas em que estes fatores estão combinados. As derrotas fornecidas por estes sistemas apresentam maiores benefícios ao serem cumpridas três condições. A primeira prende-se com a distância da viagem, pois as viagens grandes, acima de 1500 milhas, a plataforma vai estar sobre o efeito das condições meteo-oceanográficas durante um período de tempo maior. A segunda condição trata-se do espaço onde é praticada a navegação, ou seja, nas passagens oceânicas, onde não existem obstáculos, é possível a análise mais alternativas, o mesmo já não se verifica perto de costa. A última condição é a utilização destes sistemas quando as condições meteo-oceanográficas são um fator relevante na escolha da derrota. (National Imagery and Mapping Agency, 2002, p. 545)

A eficácia<sup>2</sup> demonstrada destas aplicações e a sua ampla divulgação no transporte marítimo também tem contribuído para o aumento da confiança na sua utilização. Atualmente, são uma ferramenta fundamental em navios de transporte de bens dos mais variados tipos e para o transporte de passageiros. Com a sofisticação deste tipo de sistemas as despesas operacionais são reduzidas e os prazos de entrega são mais curtos e fiáveis.

Os sistemas de apoio á decisão aplicados ao roteamento, tal como monotorização dos navios durante o seu trânsito têm sido alvo de estudo em vários países no mundo, tornando-se atualmente num dos tópicos importantes no meio marítimo.

---

<sup>1</sup> Capacidade de obtenção dos resultados necessários e com qualidade adequada com os mesmos ou menor quantidade de recursos.

<sup>2</sup> Capacidade de obtenção do resultado independentemente dos recursos utilizados.



São as petrolíferas, as companhias que mais lucram com a utilização de navios como meio de transporte do seu produto, como tal apostam fortemente nas ciências de gestão de frotas e nos sistemas de otimização de derrotas de modo a aumentar a sua competitividade e margem de lucro.

Cada sistema é adaptado á medida de cada tipo de navio, pois em todos os cálculos são tidos em conta as características do navio nomeadamente o seu comportamento dinâmico, ou seja, não existe um sistema universal.

Um exemplo onde esta impossibilidade é bem patente a é através da comparação entre dois tipos de navio diferentes. Na questão da manobrabilidade<sup>3</sup> e estabilidade<sup>4</sup>, um navio de guerra é bastante diferente de um petroleiro, pois de forma a cumprir a sua missão é necessário que tenha mais manobrabilidade no entanto o mesmo não se verifica em relação á estabilidade. Outra questão prende-se com a escolha do algoritmo que vai calcular a derrota, dado a diferença de perfil operacional dos navios é natural que o algoritmo utilizado a bordo do navio de guerra seja mais flexível na medida em que permite um cálculo mais rápido e uma fácil alteração de objetivo. Por outro lado o cálculo da derrota para um petroleiro deverá ter como base previsões mais fidedignas, sendo necessário um algoritmo mais elaborado.

Os institutos de meteorologia são um pilar fundamental dos sistemas de roteamento pelo seu apoio na recolha de dados e na difusão da informação meteo-oceanográfica. A possibilidade da utilização destes produtos em qualquer parte do globo deve-se ao trabalho desenvolvido, em conjunto, por estes institutos, assumindo assim num papel crucial para a navegação.

O principal desafio na previsão meteorológica é o da qualidade da previsão, pois embora já seja possível a obtenção de previsões com grandes amplitudes temporais, com o seu avanço no tempo esta sofre degradações sendo necessária a sua atualização periódica (entre 1 a 4 vezes por dia) durante grandes trânsitos, de forma a minimizar cálculos incorretos.

---

<sup>3</sup> “...faculdade do navio poder manobrar ou evolucionar na água.” (D’Oliveira, 1964, p. 34).

<sup>4</sup> “...faculdade do de o navio recuperar a posição de equilíbrio direita quando dela desviado.” (D’Oliveira, 1964, p. 33).



Sempre com o objetivo do aumento da segurança, os sistemas de roteamento tornaram-se essenciais para qualquer organização militar ou civil ao contribuírem, indiretamente, para a extensão do tempo de vida útil dos navios e o conforto da sua guarnição.

Algumas companhias mais conservadoras defendem a ideia de que só deveriam ser utilizados métodos que se baseiam na experiência do comandante do navio e em tradições que têm sido mantidas nas diferentes gerações de marinheiros. Os cálculos analíticos, quando necessários, são bastante elementares e referentes unicamente a dados relativos ao trânsito, tal como a hora estimada de chegada e o consumo de combustível recorrendo muitas vezes ao gráfico de consumos inicial do navio. Esta visão na atualidade é tida como demasiado conservadora sendo posta de parte pela maior parte dos profissionais do sector marítimo.

Segundo a IMO, os primeiros passos no roteamento marítimo ocorreram em 1898 ao ser adotado pela primeira vez a utilização de rotas pré-planeadas com o objetivo de aumentar a segurança da navegação. O regulamento viria, mais tarde, ser integrado no quinto capítulo na primeira Convenção Internacional para Salvaguarda da Vida no Mar<sup>5</sup> (SOLAS) em 1974. Com esta integração, foi regulamentado o estabelecimento destes sistemas, tais como os esquemas de separação de tráfego, canais de duas vias e áreas de precaução. Está também explícito na convenção a responsabilidade da IMO na implementação destes sistemas. O principal objetivo destes sistemas é a condução da navegação de forma segura, eficiente e a minimização do impacto ambiental.

Mais recentemente, em 1983, a resolução A.528 (13)<sup>6</sup> recomenda o uso de sistemas de roteamento baseados em informações meteo-oceanográficas com o objetivo de evitar condições ambientais adversas. Recomenda também os governos dos países costeiros a disponibilizem estes sistemas aos navios, preferencialmente os serviços aprovados (World Meteorological Organization, 2013) pela *World Meteorological Organization* (WMO). Apesar desta recomendação ainda navegam bastantes navios sem recurso a estes sistemas.

Através do *Global Integrated Shipping Information System* (GISIS) é possível obter vários dados sobre a navegação mundial, com uma simples pesquisa pode-se obter as mais recentes estatísticas sobre os incidentes no mar. Desde entre o início do presente milénio até

---

<sup>5</sup> *Safety Of Life At Sea*

<sup>6</sup>

junho do presente ano foram registados cerca de 5076 acidentes, dos quais 374 estão relacionados com condições meteo-oceanográficas adversas, destes, 169 são navios com mais de 5000 toneladas e apenas dois destes não tiveram consequências muito graves<sup>7</sup>. A tendência registada nos últimos anos é uma diminuição destes acidentes, como resultado da adoção dos sistemas de roteamento.

Um exemplo de um destes acidentes é o caso do “Chicago Express”, um porta-contentores alemão que pelas 02:45 locais no dia 24 de setembro de 2008 ao navegar por um tufão a 25 milhas<sup>8</sup> a sul de Hong Kong, China, viu um elemento da sua guarnição perder a vida ao sofrer um traumatismo craniano e outros cinco elementos, entre eles o comandante do navio sofreram lesões menores. O navio ao sofrer os efeitos do tufão, no momento foi registado, força 11 na escala de Beaufort e ondas com cerca de 7,5 metros de altura, atingiu um grau de inclinação de 44° por ação de uma onda. Esta inclinação fez com que a guarnição que na altura estava presente na ponte fosse atirada ao longo desta. Duas das lições aprendidas retiradas pela (IMO, 2008) deste caso foi a necessidade de conhecer os movimentos dos navios sobre condições adversas e a necessidade do uso de sistemas de otimização de derrotas de modo a fornecer aos comandantes dos navios rotas que permitem uma navegação mais segura (Couttie, 2010).

Outro caso com consequências muito graves aconteceu ao largo do cabo Carvoeiro. Segundo (Gomes, 2001) a 8 de março de 2001 o “Cheryl C”, um navio mercante com 1636



*Figura 1- Navio mercante "Cheryl C" encalhado no Cabo Carvoeiro*

<sup>7</sup> Consequências que levam é perda total do navio, perda de vidas humanas ou impacto ambiental extremo.

<sup>8</sup> Por milha é entendido ao longo desta dissertação milha náutica, sendo considerado uma milha igual a 1852 metros.



toneladas, aproximou-se demasiado do Cabo Carvoeiro tendo acabado por encalhar às 22:30. O navio encontrava-se na altura sobre condições meteo-oceanográficas adversas. Apesar dos avisos via rádio, sinais sonoros e luminosos efetuados pela polícia marítima, da capitania do porto de Peniche, o navio não conseguiu manobrar por forma a afastar-se de perigo. O relatório exposto pela (IMO, 2001) revela que as causas principais do acidente foram a falta de planeamento e a falta de consideração das condições meteo-oceanográficas. A utilização dos serviços de roteamento teria evitado este acidente, onde apesar de não haver fatalidades foi perdido o navio, a carga composta por 2245 toneladas de aço, e foram ainda derramadas 45 toneladas de combustível para a costa lusitana. Na Figura 1 é possível verificar o resultado do acidente.

Como é possível verificar com a exposição destes dois casos, o recurso aos serviços de roteamento e de otimização de derrotas pode ser uma mais-valia na navegação, podendo evitar a perda de vidas humanas, a perda da plataforma, da carga transportada e evitar danos causados pela poluição.

Embora este género de acidentes, de acordo com o PGFLOT 200 (C), não tenha acontecido na Marinha Portuguesa, esta pode ainda beneficiar com o aumento da eficiência durante o trânsito dos navios com a utilização dos sistemas de roteamento.

### 1.1. Justificação do tema

Nesta secção é justificada a escolha do tema estudado, assim como os benefícios que se poderá obter ao ser desenvolvido e aplicado na Marinha.

Devido á atual conjuntura económica do país, a Marinha sente a necessidade de aumentar a sua eficiência, continuando a cumprir a sua missão através da aplicação de uma gestão de recursos inteligente e sujeita a critérios mais rigorosos (Comando Naval, 2011, p. 8).

Este tema surge desta necessidade de otimização dos recursos energéticos, nomeadamente o combustível utilizado em grandes trânsitos, aumentando para tal a eficiência com que as derrotas são planeadas e praticadas.



Para conseguir esta dissertação recorre-se á experiência dos utilizadores dos navios, que combinado com a informação meteorológica fornecida por instituições meteorológicas, permitiu desenvolver uma aplicação que visa contribuir para o aumento da eficiência no consumo do combustível.

Atualmente os trânsitos dos navios da Armada poderão não ser os mais eficientes. O planeamento destes trânsitos é ainda baseado em procedimentos tradicionais, comparando com os atuais sistemas de roteamento, consumidores de grandes quantidades de tempo e esforços. Caso seja necessário a escolha de uma alternativa ao planeamento esta pode não ser a melhor, pois o Oficial navegador (ON) não possui capacidade ou a possibilidade de analisar todas as alternativas possíveis. De modo a permitir uma análise completa destas alternativas foi proposto a criação de um sistema de apoio á decisão, este segundo a sua definição vai utilizar métodos computacionais de modo a determinar e avaliar estas alternativas. Deste modo é obtida a derrota mais favorável do ponto de vista económico, assegurando o objetivo operacional, contribuindo assim para o aumento da eficiência.

Com a inovação tecnológica que se tem vindo a verificar, sendo que a capacidade computacional dos navios tem vindo a aumentar, é possível utilizar estes sistemas de navegação, automatizando assim a escolha de uma derrota. Embora forneça uma solução este processo nunca pode substituir o papel do pessoal responsável do navio no processo da tomada de decisão.

As corvetas são um dos tipos de navio atribuído ao dispositivo naval que mais navega, realizando ainda grandes trânsitos, nomeadamente de Lisboa para os Açores e vice-versa. Devido á realização destas navegações foi então selecionado como o navio projeto deste trabalho. Este assunto é abordado pormenorizadamente na secção 2.1.

## 1.2. Problemática

Nesta secção são abordados os assuntos da atual estrutura da Marinha, qual a sua atitude perante o problema em causa e as questões base a que o projeto se propõe a responder

Devido á atual conjuntura económica, a Marinha atravessa um período de incerteza e restrições (Comando Naval, 2011, p. 9), tendo consequências diretas na gestão dos meios



operacionais. Este facto tem lentamente mudado a atitude da Marinha, sendo que existem atualmente diretivas para a otimização e a implementação de sistemas de apoio á decisão, esta é de facto uma das linhas da ação apontadas na Diretiva de Política Naval (2011) do atual Almirante Chefe de Estado-Maior da Armada.

No desenvolvimento deste trabalho pretende-se responder a algumas perguntas sobre a implementação de sistemas com vista á otimização de recursos energéticos, nomeadamente:

- Será o combustível um fator problemático no orçamento da Marinha?
- Existe algum serviço de roteamento passível de ser utilizado pela Marinha?
- Será a aplicação desenvolvida adaptável a qualquer navio?
- Será a aplicação válida para o apoio á decisão?
- Serão os recursos disponibilizados suficientes?
- São compensados os investimentos da exploração dos serviços de roteamento?

### 1.3. Objetivos

Esta secção estabelece o objetivo principal do estudo, e identifica os objetivos parciais.

Esta dissertação surge no seguimento da evolução no campo do roteamento, havendo a possibilidade de se tornar numa mais-valia para a Marinha. Foi então proposto a investigação desta possibilidade no sentido de encontrar uma solução para a sua aplicabilidade às unidades operacionais.

Como tal o objetivo principal desta dissertação é a verificação da aplicabilidade destes sistemas na Marinha determinando o seu possível impacto.

Para o cumprimento deste objetivo principal formaram-se os seguintes objetivos parciais:

- Verificação dos tipos de navios que poderiam beneficiar com a utilização destes sistemas de roteamento e em que condições;
- Modelação expedita do perfil dinâmico das corvetas;
- Obtenção de informações meteo-oceanográficas que se adaptem ao problema;





- Desenvolvimento de um algoritmo flexível e capaz da otimização das derrotas;
- Validação da aplicação através da simulação e a comparação de vários tipos de derrotas;

#### 1.4. Pressupostos

Neste trabalho foram considerados alguns pressupostos, estes são explicados nesta secção. Os pressupostos considerados são um conjunto de condições iniciais que balizam a aplicação desenvolvida, assim como as condições para a sua utilização. Estes pressupostos devem de estar presentes durante a leitura desta dissertação.

Devido a indisponibilidade de dados sobre as correntes do atlântico, á exceção de condições climatológicas, apenas foram considerados para o cálculo das derrotas os efeitos do vento, da vaga e da ondulação.

Foi utilizado para a determinação do perfil dinâmico o desenho do Navio da Republica Portuguesa (NRP) “Batista de Andrade”. Este perfil, devido às dimensões gerais semelhantes dos navios, foi adotando para os navios da mesma classe e da classe “João Coutinho”. Tendo em conta a modelação exata deste perfil não ser um dos objetivos desta dissertação, a determinação foi obtida de uma forma fundamentalmente empírica, carece ainda de uma validação apropriada.

Ainda referente á modelação expedita do perfil do navio foi pressuposto que o navio apenas irá perder velocidade ao ser afetado pelas condições meteo-oceanográficas, visto conseguir manobrar para manter o mesmo rumo.

Uma vez que já são utilizadas pela Marinha, em outras aplicações, os dados meteo-oceanográficas derivados das previsões fornecidas pela SailDocs e visto não ser objetivo deste trabalho a validação desta fonte, estes dados de entrada servem como referencia.

Parte-se do pressuposto que apenas será necessário uma aplicação para ser utilizada a bordo, que efetue o cálculo rápido de uma derrota. O que abre caminho para que à posteriori seja desenvolvida uma aplicação que calcule uma derrota mais precisa através da análise de mais variáveis.



Na realização deste trabalho apenas foi considerado como área de operações a SRR Lisboa e a SRR Ponta Delgada visíveis na Figura 2, acresce que só é possível a sua aplicação em águas oceânicas.

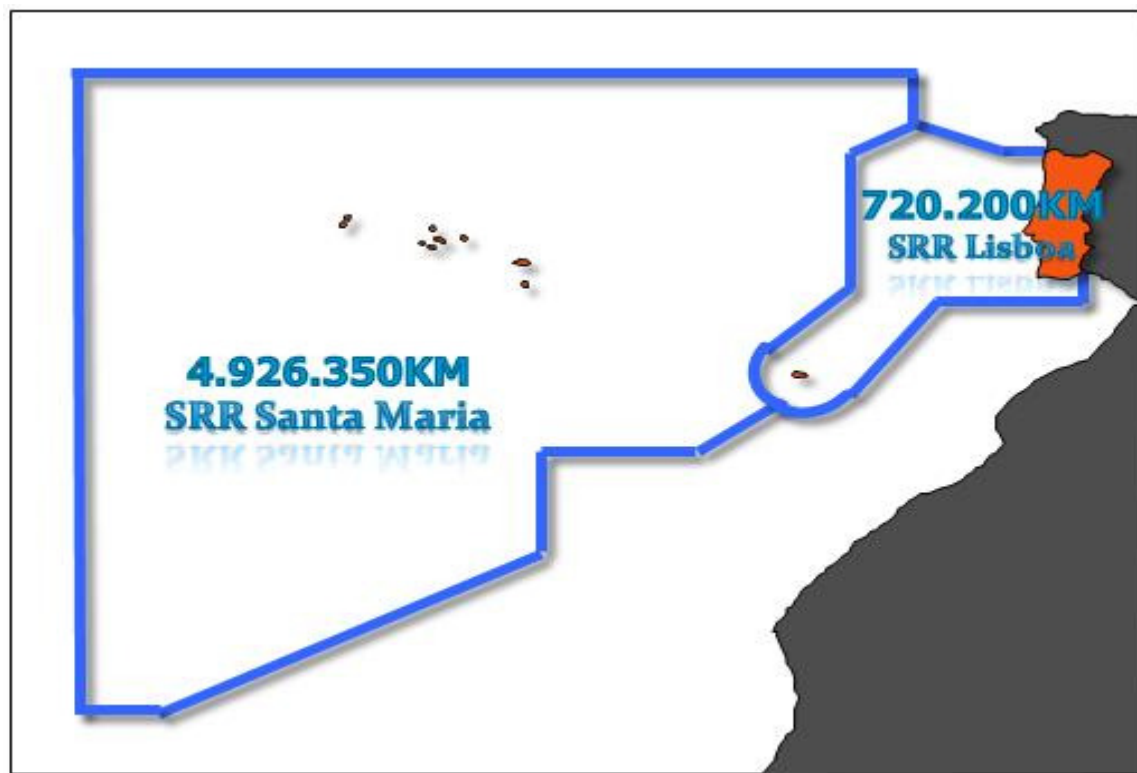


Figura 2 - Zona SAR Portuguesa (<http://comandonaval.marinha.pt/PT/mrcc/area/Pages/AreadeResponsabilidade.aspx>)

### 1.5. Metodologia da Investigação e estrutura da dissertação

Esta secção tem como principal objetivo a apresentação dos métodos utilizados para os cálculos de derrotas roteadas e provas da sua utilização noutros casos.

De modo a facilitar a compreensão da metodologia utilizada encontra-se no capítulo 2 uma breve introdução histórica sobre a evolução dos sistemas de roteamento, uma análise sobre a importância para a Marinha dos recursos despendidos na operação dos navios, nomeadamente o combustível, e uma avaliação de quais os tipos de navio que poderão beneficiar com a utilização deste género sistemas. Ulteriormente são expostos alguns dos serviços de roteamento existentes, identificando-se os principais fatores a ter em conta na escolha destes serviços. Por fim são explanados alguns dos algoritmos e metodologias



existentes para a otimização de derrotas, justificando a escolha da utilização do algoritmo de Dijkstra neste trabalho.

No Capítulo 3 é explicada a metodologia utilizada para o cálculo da perda das velocidades, permitindo assim, obter-se a noção das principais limitações do perfil determinado e a tipologia de navios onde pode ser aplicado. No final é ainda verificado como foram integrados os dados do perfil dinâmico do navio através da definição das matrizes “Vento” e “Ondas” na aplicação desenvolvida.

No capítulo 4 estão descritas as características dos ficheiros GRIB utilizados, assim como as principais precauções apontadas pela SailDocs. É ainda exposto a forma como são solicitados e os modelos em que se baseiam, sendo justificada a escolha dos modelos GFS e WW3. De seguida é explicada a sua integração na aplicação, com recurso ao suplemento READ\_GRIB, que permite a sua conversão, visualização e utilização dos dados no cálculo da derrota.

No quinto capítulo após uma pequena introdução é possível verificar uma breve explicação dos diferentes tipos de navegação, assim como em quais destes é possível a aplicação dos sistemas de roteamento. Ainda no mesmo capítulo são abordados os tipos de derrota estudados, verificadas as suas vantagens e desvantagens e ainda a sua aplicação pela Marinha Portuguesa. É ainda descrita a informação existente em cada vértice e o processo de criação do grafo utilizado. Por último é exposta a metodologia para a determinação das derrotas ortodrómicas e loxodrómicas utilizadas na comparação com a derrota roteada.

No capítulo 6 é descrita a metodologia utilizada para a integração dos dados da modelação do perfil dinâmico do navio, dos dados meteo-oceanográficos obtidos através da SailDocs e da criação do grafo. Seguidamente é demonstrada a aplicação da variante do algoritmo de Dijkstra utilizado no cálculo da derrota ótima, sendo este dividido em três processos mais simples (a procura do custo mais baixo, a alteração das variáveis e o registo do caminho). No final são expostos os resultados esperados com o cálculo obtido na validação da aplicação



No capítulo 7 procede-se á validação do modelo pelo estudo de sete testes. Destes testes, em quatro são comparadas a velocidade simulada pela aplicação com a velocidade real do navio, em dois é realizada a comparação entre os diferentes tipos de derrotas e no último é comparada uma derrota calculada com a que realmente foi praticada. São ainda comparados os resultados obtidos entre o navio NRP “Batista de Andrade” e o NRP “Jacinto Cândido” de modo a validar a utilização desta aplicação nas corvetas da Classe “Batista de Andrade” e da classe “João Coutinho”. Estes testes foram realizados para os modelos GFS e WW3 de modo a verificar quais as vantagens e desvantagens na sua utilização.<sup>9</sup>

No último capítulo são apresentadas as conclusões obtidas ao longo do trabalho assim como uma avaliação das questões inicialmente colocadas. São ainda expostas orientações e recomendações para o trabalho a ser realizado futuramente no âmbito deste projeto.

---

<sup>9</sup> Estes modelos encontram-se explanados co capítulo 4



## 2. O ESTADO DA ARTE

Neste capítulo pretende-se dar a conhecer os trabalhos realizados no âmbito do roteamento e a sua evolução ao longo do tempo. O assunto será introduzido historicamente, seguindo-se da exposição da importância para a Marinha do consumo de combustíveis. De seguida são expostos exemplos conhecidos de empresas ligadas a estes serviços, assim como os diferentes tipos de serviços fornecidos, terminando com os trabalhos e a teoria mais relevante existente no campo do roteamento.

A história dos sistemas de otimização de derrotas, embora seja relativamente recente depende da navegação e da meteorologia, pelo que neste capítulo será dado a conhecer um pouco da sua evolução no sentido da otimização, focando-se apenas nos pontos mais relevantes.

A origem da cartografia náutica portuguesa deu-se com o desenvolvimento da cartaportulano no séc., XIII, esta serviu os interesses do povo lusitano até o início das Descobrimientos Portugueses quando Pedro Nunes<sup>10</sup> identificou as limitações que as cartas daquela época apresentavam na representação da superfície terrestre. É Pedro Nunes que introduz o conceito das derrotas loxodrómicas<sup>11</sup> aos navegadores e desenvolve a noção do caminho mais curto, a ortodromia<sup>12</sup>, influenciando grandes nomes como o de Mercator<sup>13</sup> que viria em 1569 a desenvolver a projeção de Mercator através da representação do globo em um retângulo plano (Canas, 2003). Esta projeção é implementada mais tarde na cartografia em 1599 por Edward Wright<sup>14</sup>, sendo que ainda no mesmo ano são publicadas as tabelas utilizadas para a elaboração destas cartas.

No séc. XVI com a invenção do primeiro do termómetro, inventado por Galileu<sup>15</sup> em 1592, foram dados os primeiros passos na meteorologia. Anos depois em 1643, Torricelli<sup>16</sup>

---

<sup>10</sup> Pedro Nunes, matemático e português (1502-1578)

<sup>11</sup> A derrota que cruza vários meridianos com um ângulo constante. Este tipo de derrota é abordado em pormenor no capítulo 5

<sup>12</sup> A derrota ortodrómica trata-se do arco de círculo máximo, que cruza vários meridianos com diferentes ângulos. Este tipo de derrota é abordado em pormenor no capítulo 5

<sup>13</sup> Gerardus Mercator, matemático, geógrafo e cartógrafo flamengo (1512 - 1594)

<sup>14</sup> Edward Wright, matemático inglês (1558-1615)

<sup>15</sup> Galileu Galilei matemático, físico e astrónomo e filósofo Italiano (1564-1642)

<sup>16</sup> Evangelista Torricelli, físico e matemático italiano (1608-1647)



verifica que a altura do mercúrio num tubo variava no dia-a-dia devido á pressão que o ar provocava no líquido, descobrindo assim o princípio do barómetro. Os telégrafos, equipamento desenvolvido por Morse<sup>17</sup> em 1835, permitiam, que e a informação meteorológica fosse transmitida de forma confiável e rápida. A IMO, criada na conferência de Bruxelas no ano de 1873, assumiu a tarefa de coordenar a troca de informações meteorológicas entre os vários institutos. Em 1937 nos estados unidos foi criada a primeira radiossonda, um balão atmosférico com a capacidade de medição dos valores da humidade, da pressão e do vento. Permitindo o estudo das condições atmosféricas (WMO, 2013). Mais tarde a 11 outubro de 1947, durante a oitava conferência de diretores da IMO, os representantes dos 31 países decidiram criar a WMO, passando esta a ser oficial a 23 de março de 1950, de modo a assumir a tarefa de coordenar as trocas de informação meteorológica.

Com o desenvolvimento do primeiro computador por Neumann<sup>18</sup> (o *Electronic Numerical Integrator and Computer*) foi reconhecido que o problema da previsão meteorológica numérica seria uma das apostas desta emergente tecnologia. Em 1948 foi reunido um grupo de meteorologistas teóricos para a simplificação de equações na previsão meteorológica, permitindo assim que em abril de 1950 fosse criado o primeiro modelo não linear, este demorava mais de 24 horas a ser executado, provando assim que a previsão numérica era possível e praticável. A 1 de julho de 1954 foi formada a *Joint Numerical Weather Prediction Unit* (JNWPU), financiada e operada pelo *U.S. Weather Bureau*, a *U.S. Air Force* e a *U.S. Navy*, de modo a fornecer previsões operacionais numéricas em tempo real. Esta unidade era prova do crescente interesse nesta ciência por parte dos Estados Unidos e da Europa, pois contribuiria mais tarde para diminuir a quantidade de acidentes no mar devido á falta de informação. Ainda no mesmo ano foi registado que cerca de 6% da frota mundial esteve envolvida em acidentes devido aos fatores meteo-oceanográficos (NOAA, 2007) (Kotsch, 1983, p. 229).

Em 1732 é publicado pela primeira vez o famoso almanaque *Poor Richard's Almanac* por Franlin<sup>19</sup>, este almanaque serviu durante vários anos como fonte de informação climatológica para os navegadores. O primeiro serviço de roteamento terá sido desenvolvido

---

<sup>17</sup> Samuel Finley Breese Morse inventor e pintor retratista norte-americano (1791-1872)

<sup>18</sup> John Von Neumann, matemático húngaro (1903-1957)

<sup>19</sup> Benjamin Frankli, jornalista, editor, autor, filantropo, abolicionista, funcionário público, cientista, diplomata, inventor (1706-1790)



na sequência do esforço na criação de modelos de previsão numérica no início dos anos 50, na U.S. Navy. Este serviço dirigido pelo Tenente Maury<sup>20</sup> produziu cartas com a informação de correntes e ventos dominantes (através do estudo dos registos dos navios) permitindo reduzir em dias ou mesmo semanas o tempo de viagem dos navios da marinha.

## 2.1. A Importância dos combustíveis para a Marinha e tipos de navios que poderão beneficiar com os serviços de roteamento.

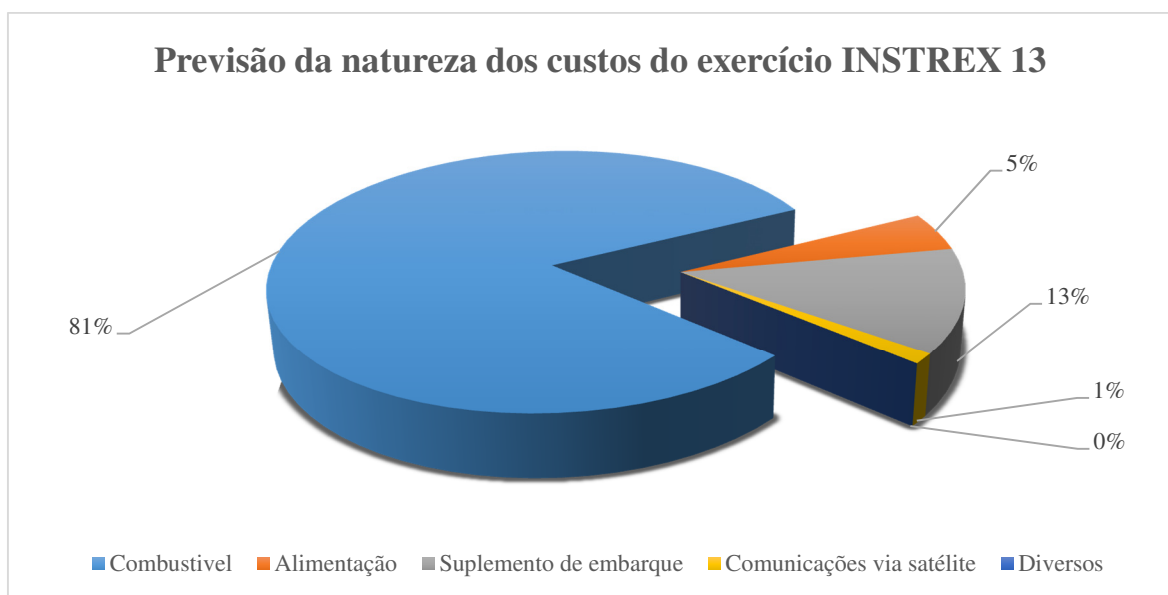
Dada a atual conjuntura económica do país a Marinha tem vindo a ser alvo de mudanças profundas. Nesta secção são expostos os valores gastos anualmente em combustível na operação dos navios e são analisados os tipos de navio da Armada poderão beneficiar com o uso dos serviços de roteamento.

Um dos desafios que atualmente a Marinha enfrenta é o acompanhamento e a adaptação aos esforços económicos do país. A missão do Comando Naval será desempenhada nos próximos tempos num contexto de restrição de recursos, ainda assim este não pode significar uma diminuição de eficácia, eficiência e segurança (Comando Naval, 2011, p. 8). Para conseguir este desiderato e o cumprimento da missão, torna-se necessário promover a inovação de sistemas, processos e soluções. Somente a melhoria da eficiência na gestão dos recursos poderá permitir alcançar este objetivo. Atualmente está a ser efetuado um esforço neste sentido, pelo que esta dissertação tenta ser mais um contributo para essa mesma linha de ação.

Patente na Figura 3 está resumido em forma de gráfico, a previsão da natureza dos custos referentes ao exercício “INTREX 13”, realizado entre 3 a 16 de abril de 2013. Este gráfico foi apresentado aos intervenientes do exercício no dia 8 de abril do mesmo ano, dando a conhecer qual o principal fator contributivo para o encarecimento dos exercícios em Portugal. A previsão inicial do custo total do exercício apresentada foi de 874.819,00€.

---

<sup>20</sup> Matthew Fontaine Maury, astrónomo, historiador, oceanógrafo, meteorologista, cartógrafo, geólogo e educador estadunidense (1806-1873)



*Figura 3- Previsão da natureza dos custos do exercício INSTREX 13*

Analisando a figura é possível verificar, a parcela referente ao combustível é de 81%, ou seja, 711.600,00€ dos gastos na execução de um exercício são com o combustível, o que demonstra a ordem de grandeza deste recurso na operação dos navios. Sendo este o principal fator responsável pela abrupta redução de exercícios realizados pela marinha.

Na Figura 5 é possível verificar o custo total de combustível, enquanto na Figura 5 é possível verificar a quantidade de combustível a navegar. Ambas as figuras são referentes aos anos de 2009, 2010 e 2011.

Como é possível verificar nas figuras são as fragatas o tipo de navio que mais consome combustível, no entanto devido às restrições impostas na Marinha, pela atual conjuntura económica do país, estes navios têm navegado cada vez menos. As corvetas por outro lado têm tido um consumo anual mais estável, este facto deve-se á natureza das suas operações sendo estas na sua maioria de fiscalização e salvaguarda da vida no mar, estas missões são de carácter obrigatório para o cumprimento da missão da Marinha pelo que, é de esperar que se mantenham ser mantidas no futuro.



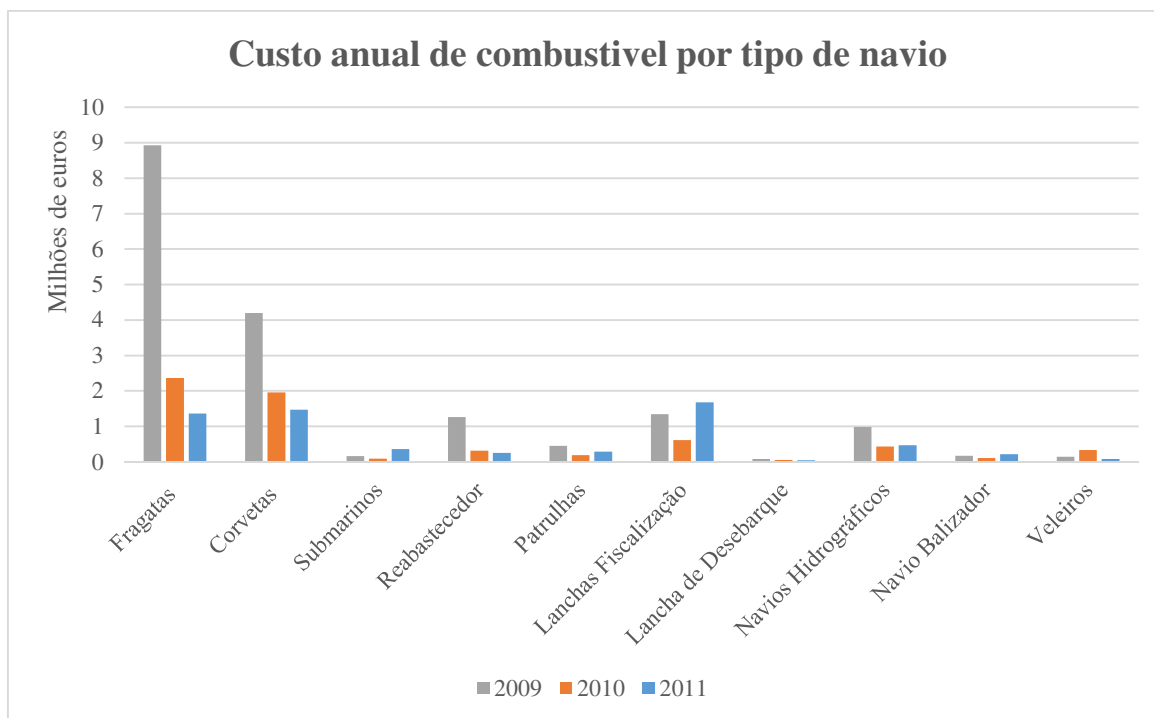


Figura 4- Custos totais anuais do combustível F76 dos navios da Marinha (COMNAV)

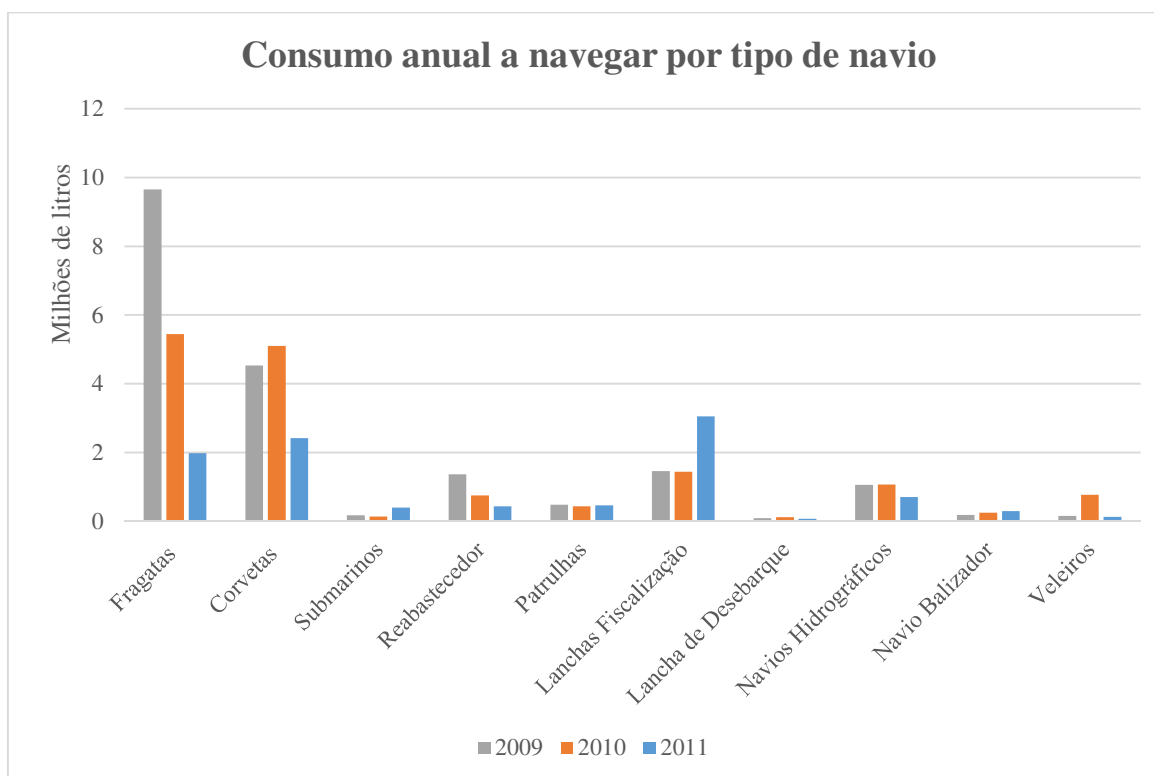
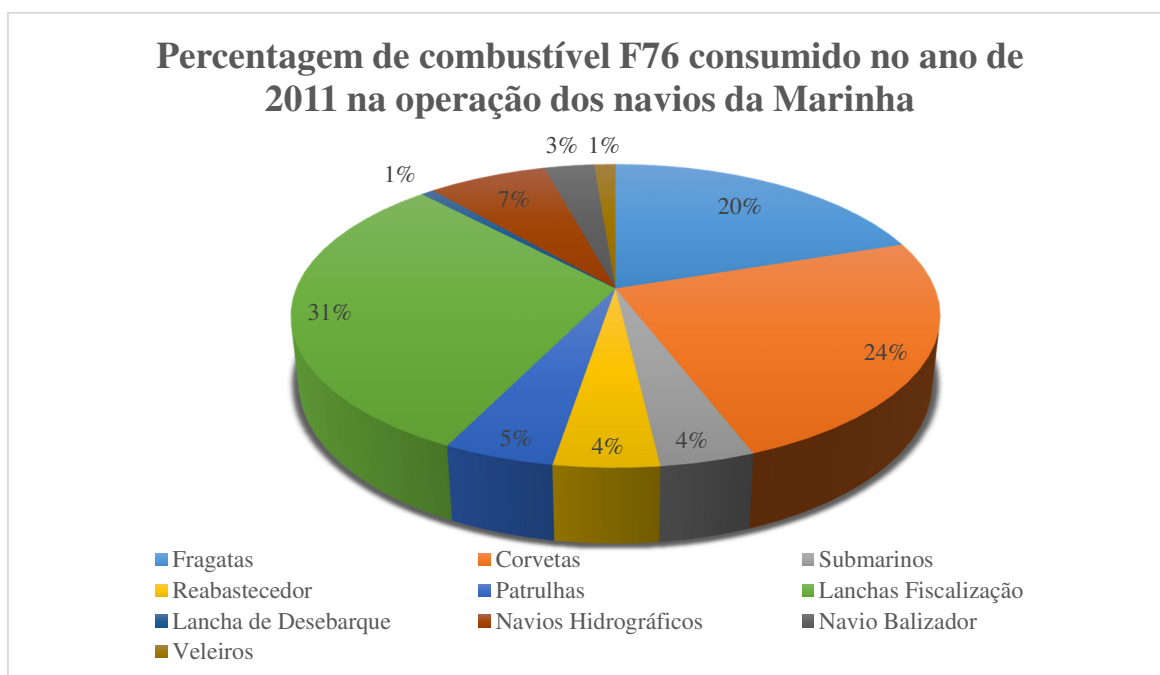


Figura 5- Consumos anuais F76 na operação dos navios da Marinha (COMNAV)



*Figura 6 - Percentagem de combustível F76 consumido no ano de 2011 na operação dos navios da Marinha (COMNAV)*

. Com a análise da Figura 6, onde se encontra a percentagem dos combustíveis gastos na operação dos navios, é possível verificar que cerca de 75% do combustível é consumido pelas fragatas, corvetas e lanchas de fiscalização. Na atualidade as lanchas de fiscalização têm como principal missão a patrulha da área costeira do país, devido a este facto não é possível a aplicação de serviços de roteamento. Segundo a figura são as corvetas, com cerca de 24%, que têm o segundo maior consumo de combustível. Apesar de recentemente a sua navegação ter sido reduzida para o essencial, continuam a ser efetuados grandes trânsitos para os Açores, trânsitos nos quais é possível a aplicação de serviços de roteamento. As fragatas devido ao facto de serem principalmente empregues em missões no âmbito da defesa militar e apoio á política externa viram a sua operação ser reduzida ao mínimo.

O estudo deste tema não pode ser aplicado a qualquer navio, como anteriormente referido, estes para beneficiarem com o uso deste sistema de apoio á decisão têm de praticar grandes trânsitos preferencialmente acima das 1500 milhas de trânsito em águas oceânicas de modo a que a derrota praticada tenha um maior efeito (National Imagery and Mapping Agency, 2002). Referente à tipologia de missões dos navios é evidente que apenas as fragatas são empregues missões deste género, no entanto como foi anteriormente referido as missões são demasiado específicas para se poder efetuar um estudo da aplicabilidade deste género de



serviços. As corvetas ao navegar para os Açores cumprem um trânsito de aproximadamente 800 milhas sendo que num ano são realizadas oito viagens. Assim, julga-se ser o navio que mais se aproxima das condições necessárias para compensar a aplicabilidade destes serviços.

Outros navios, como os patrulhas e as lanchas, devido á respetiva área de operações não beneficiam com estes serviços. Os submarinos também não beneficiam com este género de serviço devido ao facto de efetuarem, na maioria das vezes, o trânsito em imersão, não sofrendo tanto os fatores meteo-oceanográficos. Tal como as fragatas o reabastecedor de esquadra, devido á natureza das suas missões, não é considerado para este estudo embora, seja um navio propenso á utilização destes serviços. Existem ainda outros tipos de navio como as patrulhas oceânicos, os hidrográficos e os veleiros, que embora com muito menos expressão nos custos anuais do consumo de combustível podem ainda ser alvos da utilização destes serviços.

## 2.2. Tipos de serviços atualmente existentes

Esta secção é dedicada á identificação e caracterização de alguns serviços de roteamento atualmente existentes.

O roteamento é uma atividade em expansão, sendo que existem vários tipos de serviços disponíveis. Cada serviço tem as suas especificações, no entanto é possível agrupá-los em duas categorias distintas, estas diferenciam-se pela localização onde é feita a análise dos dados meteo-oceanográficos e o posterior cálculo da derrota.

A primeira categoria é geralmente utilizada antes das viagens e tem a particularidade de necessitar de uma estação em terra. Por vezes é a mesma estação que fornece as previsões meteorológicas às plataformas, estes serviços podem ser, por exemplo, uma simples estação meteorológica, que com base na experiencia de marinheiro dos seus operadores, pode aconselhar uma derrota, chegando ao nível de uma equipa de profissionais e especialistas que operam equipamentos exclusivos, para o cálculo automático de derrotas e monitorização do seguimento do navio, através dos quais analisam o desempenho do navio e atualizam, em tempo real, a derrota fornecida.



A segunda categoria, é operada a bordo através de um *software*, instalado num computador, que ao analisar uma previsão meteorológica aplica um algoritmo de cálculo. Este algoritmo é muito mais simples e bastante mais rápido que os algoritmos utilizados para o mesmo cálculo na estação em terra. Alguns destes *softwares* estão acoplados a sistemas de análise ambiental, que permitem a recolha de dados relativos á reação do navio em determinadas condições, possibilitando assim, um cálculo de uma derrota mais rigorosa e eficiente. No entanto, este género de sistema pode por vezes comprometer a otimização da derrota devido ao facto de ser mais frágil e estar numa plataforma móvel.

Utilizadores dos serviços de roteamento testemunham ganhos não só em termos de poupança de combustível, “... entre 5% a 10% por cada passagem oceânica”<sup>21</sup> (Hung, 2013), mas também um maior conforto durante a viagem assim como um ganho na segurança da guarnição, da plataforma e da carga transportada.

---

<sup>21</sup> Traduzido de “*I estimated fuel savings of 5% to 10% for each ocean passage*”



## Otimização das derrotas dos navios do tipo corveta

A Tabela 3 apresenta com alguns exemplos de serviços, fornecidos por várias organizações, de sistemas de apoio á decisão na otimização de derrotas

Tabela 3- Exemplos de atuais fornecedores e serviços de roteamento e previsões meteo-oceanográficas.

Organização fornecedora do serviço	Previsão meteorológica	Avisos de tempestade	Roteamento	Modelação e monitorização De performance	Controlo de frota	Meio de comunicação	Categoria
<i>Aerospace and Marine International (USA)</i>	✓	✓	✓		✓	<i>Browser On-board</i>	<i>Comercial</i>
<i>Applied Weather Technology (USA)</i>	✓	✓	✓		✓	<i>E-mail On-board</i>	<i>Comercial</i>
<i>Predict wind (NZL )</i>	✓		✓			<i>Browser On-board</i>	<i>Recreio</i>
<i>Methworks (UK)</i>	✓		✓		✓	<i>On-board E-mail Telex/Satcom</i>	<i>Geral</i>
<i>Force Technology (DNK)</i>	✓	✓	✓	✓	✓	<i>E-mail On-board</i>	<i>Geral</i>
<i>MACSEA (USA)</i>				✓	✓	<i>On-board</i>	<i>Comercial Militar</i>
<i>MAXSEA (UK,FR)</i>	✓		✓			<i>On-board</i>	<i>Geral</i>
<i>Oceanweather INC. (USA)</i>	✓	✓	✓		✓	<i>E-mail Fax</i>	<i>Geral</i>
<i>Weather News (JPN)</i>	✓	✓	✓			<i>Browser On-board</i>	<i>Geral</i>
<i>Weather Routing Inc. (USA)</i>	✓	✓	✓		✓	<i>E-mail Fax Telex/Satcom browser</i>	<i>Geral</i>

Todos estes serviços e sistemas funcionam com um só objetivo, o de fornecerem ferramentas que permitam aos navegantes a otimização das suas derrotas. O recurso a estas ferramentas possibilita uma margem de lucro maior. Algumas destas ferramentas permitem



a avaliação de vários objetivos, como de por exemplo, economia do combustível e cumprimento da hora de chegada estimada, no entanto este processo vai stressar os algoritmos, pois muitos deles foram desenvolvidos para o cumprimento de um só objetivo.

Existe uma grande panóplia de serviços disponíveis, embora apenas tenha sido apresentado uma pequena porção, estes são bastante variados sendo que cada um tem as suas próprias características. Na sua escolha deve de ser sempre ponderada o tipo de informação necessária.

### 2.3. Tipos de algoritmos existentes

A otimização define-se como a “procura de uma alternativa com o melhor custo efetivo ou a performance mais elevada atingível com determinadas condições...”<sup>22</sup> (Business Dictionary, 2013), esta é atingida, através da minimização ou maximização, de uma função objetivo. No caso desta dissertação o objetivo da otimização é o cálculo de uma derrota onde é minimizado o consumo de combustível, tendo em conta o perfil hidrodinâmico do navio, sobre a influência das condições meteo-oceanográficas fornecidas através de uma previsão.

No campo da otimização de derrotas existem vários tipos de algoritmos e abordagens para o estudo deste problema. Estes algoritmos podem ser classificados em dois tipos de optimizadores, a otimização da derrota com base nas condições meteo-oceanográficas<sup>23</sup> (OSTR) e a monitorização da performance<sup>24</sup> do navio. De seguida são descritos os enfoques de cada tipo de optimizador, alguns dos algoritmos e principais trabalhos desenvolvidos na área.

Os OSTR são a arte e a ciência do cálculo da derrota ótima baseada nas previsões meteo-oceanográficas, nas características do navio, nas correntes oceânicas e requisitos da carga transportada. Antes do início da viagem é fornecido ao comandante do navio a informação detalhada das condições meteo-oceanográficas e uma derrota inicial calculada com base nas condições anteriormente referidas. Neste género de sistemas o esforço centra-

---

<sup>22</sup> Traduzido de “Finding an alternative with the most cost effective or highest achievable performance under the given constraints”

<sup>23</sup> Optimum Ship Track Routing

<sup>24</sup> Vessel Performance Analysis

se no cálculo da derrota a seguir pelo navio. De seguida são apresentados alguns algoritmos e trabalhos realizados cujo objetivo é o cálculo da derrota ótima.

O algoritmo de Dijkstra<sup>25</sup>, desenvolvido em 1956 e publicado em 1959, é o algoritmo mais popular para a resolução do “problema do caixeiro-viajante”<sup>26</sup> (Goodman, Lauschke, & Weisstein, 2013). A aplicação deste algoritmo é bastante simples e rápida<sup>27</sup>, qualidades que justificam a sua preferência para a resolução desta tipologia de problemas. O algoritmo resolve a função recorrendo a um grafo<sup>28</sup>, a vértices<sup>29</sup> e os arcos<sup>30</sup>. No início do processo de cálculo é atribuindo o valor inicial de  $\infty$  no custo de cada vértice, sendo que apenas o vértice de partida têm custo zero. Todas os arcos têm um custo de passagem, sempre que o algoritmo é iniciado vai ser procurado o valor do arco mais baixo e somado ao vértice destino. O algoritmo vai ser continuamente executado até chegar ao vértice de chegada. Na Figura 7 é possível visualizar este processo de resolução. Este algoritmo foi adotado na conceção da aplicação desenvolvida, devido às vantagens que apresenta e a simplicidade da sua aplicação neste género de problemas. À semelhança desta dissertação, também (Montes, 2005) aplica este algoritmo na otimização de derrotas através de uma rede de vértices.

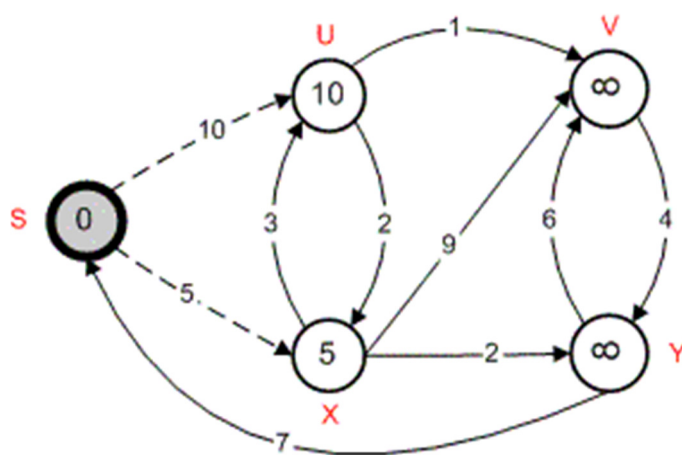


Figura 7- Exemplo do cálculo gráfico recorrendo ao algoritmo de Dijkstra

<sup>25</sup> Edster Dijkstra, Cientista da computação holandês (1930-2002)

<sup>26</sup> Também conhecido com o problema do caminho mais curto, onde é minimizado o custo da travessia de vários caminhos de modo a obter o caminho mais viável. Este problema tem a classificação de NP Complete, ou seja, em termos de complexidade computacional é um problema de decisão em que a sua elevada dificuldade está na sua resolução num curto espaço de tempo.

<sup>27</sup> Comparado com outros algoritmos como o Bellman-Ford e Floyd-Warshall

<sup>28</sup> Rede de vértices onde estes representam posições, enquanto os arcos representa caminhos.

<sup>29</sup> Posições entre arcos.

<sup>30</sup> Caminho representado por uma reta ou uma seta ao qual está associado um custo.

Ainda no ano de 1956 Bellman<sup>31</sup> cria a “programação dinâmica de Bellman” (Bellman, On a routing problem, 1956) (Bellman, On the theory of dynamic programming, 1952). A metodologia do algoritmo trata-se da divisão de um problema complexo em vários problemas simples. É criada uma derrota inicial, chamada de hipótese inicial, com base em uma função custo, de seguida é criada uma rede com várias colunas ao longo da curva com  $n$  pontos. Para cada coluna criada vai ser calculado o custo de passagem por cada ponto e selecionado o menor, se a passagem por esse ponto melhorar o resultado final é utilizado para a definição de uma nova curva. O processo é então repetido até que seja encontrada uma curva em que na sua vizinhança não existam pontos que melhorem a solução. Apesar da complexidade na definição de custo e de apenas possibilitar o cálculo de um único objetivo, este algoritmo é conhecido pela sua rapidez e pelo facto de o resultado obtido ser uma solução absoluta. Na Figura 8 encontra-se um exemplo da utilização deste algoritmo. Mais tarde Hoffschildt et al. (1999) (citado em Hinnenthal, 2008, p. 5) aborda e aplica este algoritmo ao roteamento. Mais recentemente este algoritmo foi modificado permitindo o cálculo do rumo e a consideração do regime de máquinas (Wei & Zhou, 2011)

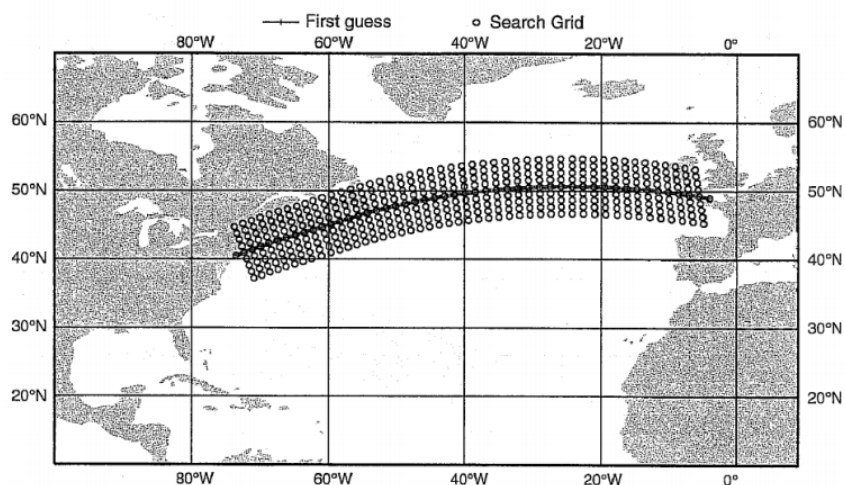


Figura 8- Exemplo da utilização da "programação dinâmica de Bellman" (Hinnenthal, 2008, p. 5)

Outro método bastante utilizado é o método Isocrónico, este vai calcular a maior distância percorrida, num intervalo de tempo definido, para várias direções, tendo em conta as condições meteo-oceanográficas. É possível visualizar na Figura 9 o cálculo de uma derrota recorrendo a este algoritmo. Inicialmente são calculadas as direções para as quais

<sup>31</sup> Richard Ernest Bellman, matemático (1920-1984)





foram percorridas as maiores distâncias e obtidos os pontos intermédios. Para cada um destes pontos é efetuado um novo cálculo, permitindo que no final seja obtida a derrota com o menor consumo de tempo.

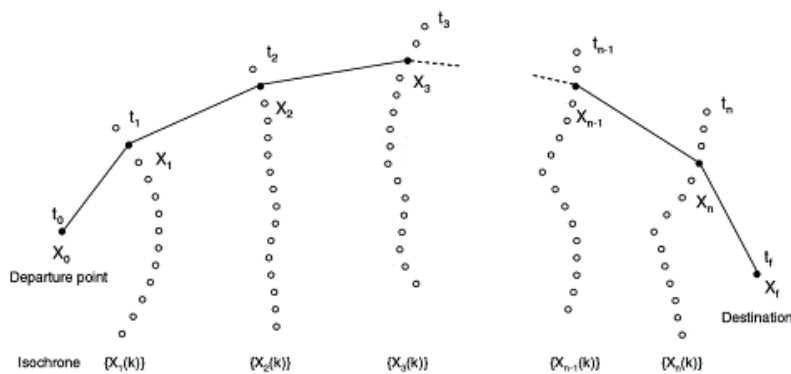


Figura 9 - Exemplo do cálculo de uma derrota pelo método isocrónico

O método Isopone (Hagiwara & Spaans, 1987) surgiu da necessidade de otimizar a derrota tendo em conta o consumo de combustível. Este trata-se de uma extensão do método isocrónico, que vai calcular o menor consumo, para várias direções em intervalos de tempo determinados, ao invés da distância percorrida. Este método foi instalado pela primeira vez a bordo, no ano de 2000, por (Spaans & Stoter, 2000) com o nome de Ship Performance Optimization System (SPOS)

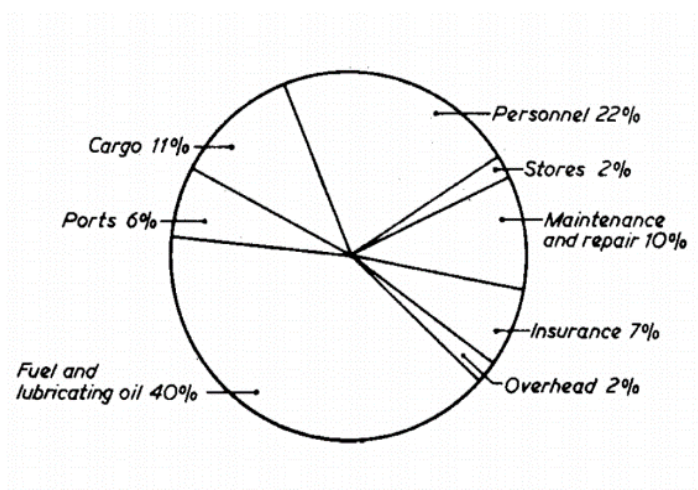
A monitorização da *performance* do navio por outro lado permite ao utilizador a obtenção de relatórios diários baseados nas condições meteo-oceanográficas. As informações presentes nestes relatórios são por exemplo o consumo, a velocidade em relação ao fundo e o comportamento dinâmico do navio. Embora sejam fornecidas derrotas iniciais com alguma ponderação, a principal função destes sistemas é a operação do navio dentro dos limites especificados.

A monitorização da *performance* do navio teve o seu desenvolvimento inicial quando o objetivo da otimização centrou-se não na derrota mas no desempenho dinâmico do navio. Estes estudos foram aumentando o seu grau de complexidade de forma a acompanhar a evolução dos restantes sistemas de otimização.



Em (Benford, 1965) e (Nowacki, 1970) são otimizadas as dimensões genéricas dos navio, com estes estudos foi possibilitada a adaptação do tamanho dos navios com o objetivo de ser otimizado o custo de transporte e o lucro obtido, mais tarde otimizam o estudo aos casos particulares dos petroleiros e cargueiros no geral, minimizando assim o seu custo de operação no transporte de bens. Não só as dimensões gerais dos navios foram alvo de estudo, a forma do casco foi também alvo de estudado por (Harries, Parametric Design and Hydrodynamic Optimization of Ship Hull Forms, 1998) que desenvolveu um modelo computacional para a otimização paramétrica da forma do casco, sendo esta otimizada mais tarde por (Harries & Lothar Birk, 2003).

Paralelamente foi estudada a influência da perda natural de velocidade, também abordado neste trabalho, por (Journé & Meijers, 1980). No seguimento do relatório apresentado por (Jounée , 1976), e ao serem estudas estas perdas foi permitido o avanço necessário para a criação de várias ferramentas de otimização na construção de navios. Estas perdas de velocidade são causadas pela interação da plataforma com o mar e pelo esforço efetuado pela instalação propulsora. Ainda no mesmo relatório (Meijers, 1980) aborda os aspetos económicos de navios roteados chegando á conclusão de que através da utilização destes sistemas existe uma redução significativa dos gastos de operação dos navios sendo os fatores mais influenciados o consumo de combustível e o consumo de lubrificantes. Na Figura 10 é possível verificar a distribuição dos aspetos estudados.



*Figura 10- Exemplo da distribuição dos aspetos económicos operacionais de uma frota com o recurso de sistemas de otimização de derrotas (Meijers, 1980)*



O algoritmo Simplex desenvolvido por Dantzing<sup>32</sup> em 1935 trata-se de um algoritmo de otimização bastante popular na programação linear, é resolvido com recurso a um gráfico onde são representadas todas condições do problema. De seguida, estas condições são transformadas de modo a que seja criado um polígono, este define a área praticável onde se encontram todas as soluções possíveis, na qual através de uma função maximizadora ou minimizadora é possível determinar o mínimo ou o máximo da área definida, sendo este valor é a solução ótima do problema. A variante (Nelder & Mead, 1965) foi desenvolvida de modo a permitir o uso deste algoritmo em otimizações não lineares. A aplicação deste algoritmo na otimização de derrotas é feita em conjunto com o algoritmo de Bellman por (Hinnenthal, 2008), através da determinação de todas as derrotas possíveis dentro de um intervalo espacial. De seguida são representadas as condições do comportamento dinâmico do navio e com a aplicação do algoritmo Simplex é determinada a derrota ótima. O recurso a este algoritmo é desaconselhado pois apesar da sua rapidez, pode ser achada uma solução local ao invés de uma solução absoluta.

Os algoritmos genéticos são baseados na teoria da evolução de Darwin, pelo que são calculados vários pontos de modo aleatório, estas soluções são chamadas de população. Cada solução tem determinadas características próprias, através da sua representação gráfica é aplicada uma função de satisfação (função *fitness*). Com o estudo da função *fitness* e com a sua maximização é possível a obtenção da solução ótima do problema. A principal desvantagem do recurso a este algoritmo é a sua lentidão, no entanto a solução encontrada tem uma elevada probabilidade de ser a solução absoluta. Este algoritmo é otimizado por (Hinnenthal, 2008) ao ser aplicada a otimização de Pareto.

Foi ainda estudada a aplicação deste género de algoritmos no planeamento da sequência de portos e na arrumação da carga a bordo do navio de modo a permitir a gestão flexível de uma frota com dois ou mais navios (Martins, Moura, Campos, & Lobo, 2010).

Resumindo os algoritmos e as metodologias existentes para o cálculo da derrota ótima, é possível a sua classificação em dois tipos, os OSTR e a monitorização da performance do navio. Com a exposição dos diferentes algoritmos é justificada a escolha do algoritmo de Dijkstra para o cálculo da derrota na aplicação desenvolvida, pelo facto de este

---

<sup>32</sup> George Bernard Dantzig, matemático estadunidense (1914-2005)



### *Otimização das derrotas dos navios do tipo corveta*

ser de aplicação fácil permitindo um cálculo rápido e flexível. A utilização deste algoritmo possibilita a utilização da aplicação a bordo.



### 3. MODELAÇÃO DO PERFIL DINAMICO DOS NAVIOS

Neste capítulo é estudada a reação do navio sobre a influência de determinadas condições meteo-oceanográficas. Com este estudo pretende-se desenvolver matrizes que traduzam esta reação na perda de velocidade por parte do navio, permitindo assim o cálculo da derrota que apresenta a menor redução da velocidade do navio

Sendo o comportamento do navio uma das componentes mais importantes do sistema é necessário aprofundar o seu estudo nas mais variadas condições meteo-oceanográficas. Esta modelação determina que o trabalho demonstrado seja específico para as corvetas. Para uma possível adaptação a outro tipo de navios é necessário uma nova modelação.

Antes de dar início ao estudo do perfil hidrodinâmico das corvetas, é necessário obter uma sólida base teórica, de modo a permitir uma modelação simplificada e expedita.

Várias organizações analisam a resposta do navio às mais variadas condições meteo-oceanográficas, ou seja, de forma a prestarem um serviço de qualidade na otimização necessitam de obter informações sobre a reação do navio. Estas informações vão influenciar o modo como o algoritmo vai calcular a derrota, ao serem dadas diferentes ordens de grandeza aos vários fatores meteo-oceanográficas (Hinnenthal, 2008, p. 26).

Através de uma comparação simples, um veleiro e um petroleiro do mesmo comprimento, é possível demonstrar com um modelo, o modo como reagem diferentemente aos mesmos fatores meteo-oceanográficos

O veleiro, assumindo que está com as velas içadas, vai ser mais influenciado pelo vento que o petroleiro, isto deve-se ao facto do veleiro ter mais área vélica<sup>33</sup>. Por outro lado o petroleiro deverá de ser mais influenciado pela vaga, ondulação e corrente devido à dimensão das suas obras vivas<sup>34</sup>.

Cada navio ao ser construído é projetado de modo a obter um determinado grau de certas qualidades náuticas. Para a determinação destas é necessário considerar a missão que irá ser desempenhada, estas vão ser afetadas em parte pelo modo como as plataformas são conduzidas.

---

<sup>33</sup> Área exposta á ação do vento

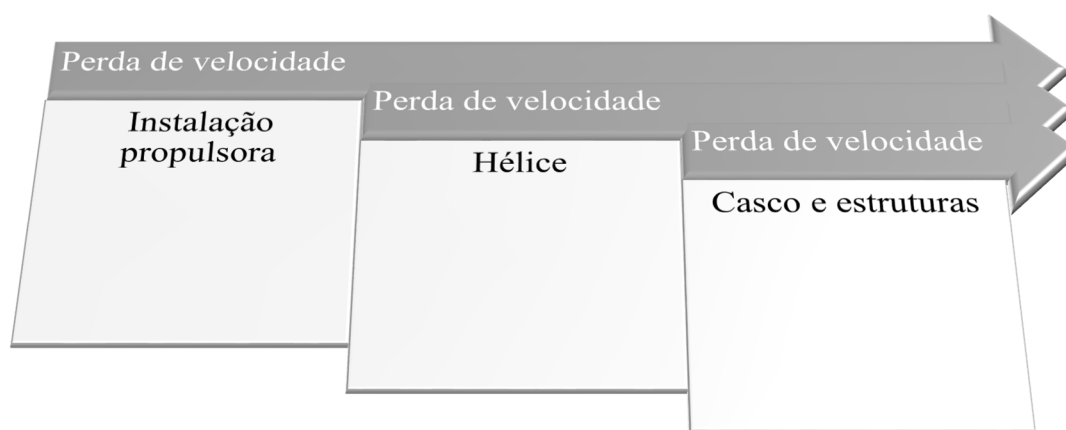
<sup>34</sup> Parte do casco do navio que se encontra imersa. (PMA 2 - O navio, pp. 1-3)



Embora estas qualidades existam em todas estas plataformas, não é possível a construção de um navio com todas estas qualidades desenvolvidas ao mais elevado grau de perfeição, em alguns casos são inclusive antagónicas. Um exemplo deste facto é o caso dos navios de guerra, que no seu geral, têm de sacrificar espaço habitacional e estabilidade, de modo a elevarem os graus da flutuabilidade, robustez e mobilidade.

A mobilidade depende de dois fatores, a velocidade e a autonomia do navio. A velocidade exige uma força propulsora, sendo que esta é aplicada num meio viscoso e ainda que o navio se desloca nesse mesmo meio serão criadas várias resistências.

Existem várias fontes de resistências ao movimento do navio, parte destas fontes são externas, causadas por efeitos das condições meteo-oceanográficas e por efeitos da interação do navio com os meios onde se encontra. Outras são internas, A perda de velocidade do navio vai depender de alguns fatores elementares: a dimensão do casco, a sua forma, as superestruturas do navio, as dimensões e as características do hélice e por fim o *output* e características da instalação propulsora como é possível verificar no esquema presente na Figura 11.



*Figura 11 - Esquema das resistências internas ao avanço da plataforma*

Devido a sua complexidade e ao facto de não estarem inseridos no objetivo do trabalho proposto estes cálculos não serão efetuados, visto que carecem de estudo próprio. No entanto estas fontes de resistência são tidas em conta, no cálculo das derrotas, visto já



estarem incluídas nos gráficos de consumo dos navios. Como não é utilizado um não é utilizado um modelo nos testes, mas sim o próprio navio, estas perdas produzem o seu efeito durante a realização os testes.

Ao estudar este assunto é necessário verificar que existem dois tipos de perda de velocidade, a perda de velocidade voluntária e a velocidade perdida involuntariamente, estas serão exploradas de seguida.

As perdas voluntárias de velocidade relacionam-se com o fator humano, estas perdas podem ser por decisão de alteração do regime das máquinas, alteração da proa do navio ou a dificuldade na manutenção da proa do navio. No primeiro caso a perda de velocidade é registada ocasionalmente, mas com grandes amplitudes, devido principalmente a decisões, por parte dos Oficiais de quarto à ponte (OQPs), como resultado de vários eventos que podem por em causa a integridade do navio, visto que em algumas destas situações é necessário parar o navio ou fazer guinadas francas. Outras perdas voluntárias têm uma frequência mais elevada, embora a sua amplitude seja normalmente reduzida, um exemplo onde é evidente estas perdas é na manutenção da proa do navio, neste caso tanto a frequência como amplitude dependem da experiência do marinheiro de leme.

Já foram desenvolvidos alguns estudos neste âmbito, como os realizados por (Jounée , 1976, p. 9) ,onde são estudados os efeitos da navegação circundante e (Hinnenthal, 2008, p. 46) onde são determinados os fatores ambientais limite para o enjoo da guarnição. Também foram desenvolvidos algoritmos, como os pilotos automáticos, existentes nas fragatas, que ao serem integrados em sistemas inerciais, permitem obter um significativo aumento da eficiência no governo do navio. No entanto este sistema não está em uso nas corvetas pelo que não será considerado no modelo desenvolvido. O cálculo destas perdas de velocidade são complexos e de difícil de previsão sendo que parte deste problema pode ser facilmente contornado através do cálculo de uma nova derrota. Foi com a intenção de facilitar esta alternativa que foi escolhido um algoritmo flexível e rápido o suficiente que permitisse o seu uso a bordo.

As perdas de velocidade deste tipo não são consideradas no cálculo das derrotas, pois o seu cálculo depende de vários fatores para os quais é necessário o estudo adequado. A inclusão deste tipo de perdas iria simplesmente adicionar mais um erro deteriorando assim o cálculo ao invés de adicionar uma melhoria.



As perdas involuntárias devem-se principalmente á interação da plataforma com o meio envolvente, visto que esta desloca-se em dois meios diferentes e ainda que nenhum destes é um fluido perfeito<sup>35</sup>. Assim, é necessário estudar a interação destes fluidos com o navio. Nestes dois meios vão ocorrer várias resistências ao movimento do navio.

Qualquer corpo imerso num fluido perfeito não sofre qualquer resistência. Independentemente da sua forma as linhas de corrente irão voltar á sua posição inicial e as forças resultantes serão nulas.

Para o cálculo da derrota na aplicação são consideradas todas as resistências internas, a resistência do efeito do vento, da vaga e ondulação. A resistência derivada ao efeito da corrente não será considerada devido á falta de um modelo que defina corretamente e com a precisão necessária o sistema de correntes da área abordada.

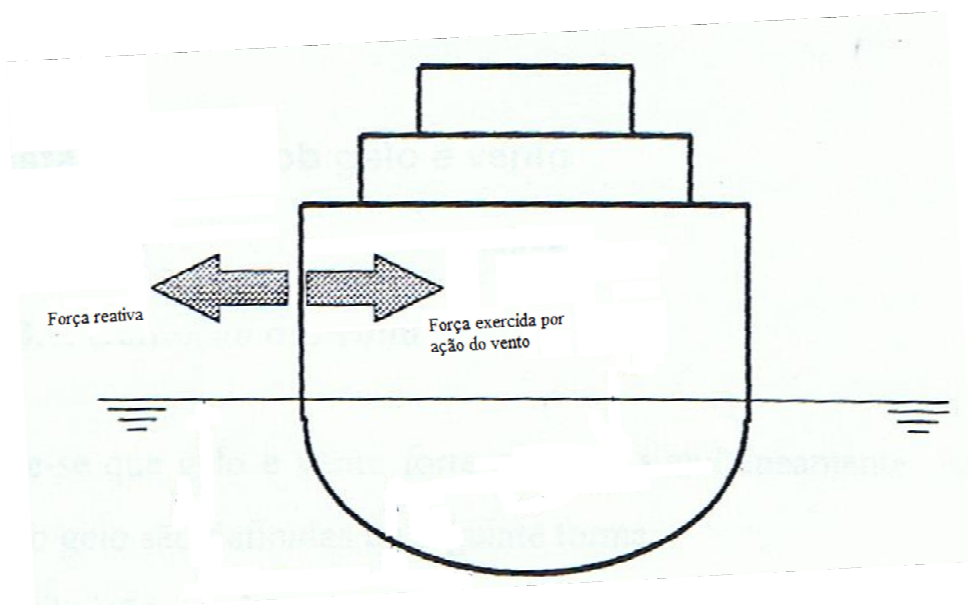
O principal objetivo da modelação expedita do perfil dinâmico é a obtenção da alteração á velocidade definida pelo operador na aplicação, permitindo assim que o cálculo da derrota seja executado com a correta influencia dos fatores meteo-oceanográficas.

Para a modelação do perfil dinâmico do navio partiu-se de simplificações, estas permitem a modelação expedita, embora com um menor rigor a modelação vai cumprir o seu objetivo, ao ser obtida a ordem de grandeza do efeito do vento, e da ondulação da vaga. Para o cálculo destes efeitos foi considerado que o navio é apenas uma superfície plana estática e que apenas seria exercido na sua superfície a força da pressão. O momento considerado para o efeito é quando o fator entra em contacto com a superfície provocando uma força. Na superfície como reação será causada uma outra força com a mesma amplitude e direção mas com sentido oposto. A Figura 12 exemplifica esse mesmo momento.

---

<sup>35</sup> Fluido incompressível e cuja viscosidade é zero





*Figura 12 - Ilustração das forças exercidas no momento de contacto*

### 3.1. Recolha de Informação

A escolha da fonte de informação para a modelação é uma decisão importante, deste modo foi optado pela solicitação à Direção de Navios do desenho 1900/DE-030/19750863 do NRP “Baptista de Andrade” como fonte principal. De seguida foi simplificado e a partir desta simplificação foram calculadas as tabelas de perda de velocidade. A presente secção tem como objetivo explicar a forma como foi executado este procedimento.

Para a modelação foram tidas em conta as características do navio a modelar, ou seja, através da consulta ponto 2.2 “Definição da aplicação dos critérios” na página 2.2, do ITIDINAV 802 (A), assinalado no excerto presente no Anexo 1 a vermelho, e da tabela 4.2 “Velocidades dos ventos nominais” na página 4.3, assinalado a vermelho no Anexo 2, é possível verificar que as corvetas são da categoria “A1-Navios de guerra oceânicos” devem de ser feitas as contas para ventos até 90 nós (Marinha Portuguesa, 1996, p. 2.2 e 4.3).

De modo a permitir o cálculo da área vélica foi necessário a simplificar o desenho do navio, o cálculo de cada secção pormenorizada seria demorosa e não significaria uma melhoria significativa no resultado final pelo que foi optada esta metodologia de trabalho. Esta simplificação pode ser visualizada no Apêndice 1. É ainda relevante relembrar que, esta



dissertação não tem como objetivo a modelação exata do navio. No entanto para a elaboração de um algoritmo de cálculo de derrotas, é obviamente que, quanto maior for o nível de exatidão do perfil, mais rigoroso será o cálculo da derrota, com a desvantagem da maior necessidade de processamento (tempo e capacidade computacional).

Outra característica do navio que foi simplificada foi o mastro<sup>36</sup>, este foi excluído da simplificação devido ao facto de ser tubular. De modo a incluir o mastro na simplificação, seria necessário considera-lo um mastro fechado, o que incluiria um erro maior, devido á sua altura, comparando com o erro adicionado ao ser excluído.

Segundo a metodologia exposta no (Marinha Portuguesa, 1996, p. 3.2) no ponto 3.1.2 “Determinação do centróide da área vélica”, presente no Anexo 3, para o cálculo da área vélica foi necessário dividir o desenho do navio em faixas longitudinais com um metro de altura desde a linha de água, no Apêndice 2 é possível visualizar esta divisão. Na sequência desta divisão foram identificadas as várias faixas de vante para ré e da quilha para o topo das superestruturas. Como resultado desta divisão foi obtido a tabela presente no Apêndice 3 e obtido o gráfico presente no Apêndice 4, como não será calculado o braço inclinante não foi necessário obter a posição do centróide da área vélica.

Com o deslocamento do navio em diferentes fluidos, sejam estes o ar e a água serão criadas várias resistências ao avanço.

Segundo o método de Froude que é traduzido na seguinte equação:

*Equação 1 - Resistência segundo o método de Froude( (Rawson & Tupper, 2001, p. 395))*

$$R_t \text{ (Resistência total)} = R_f \text{ (Resistência de Atrito}^{37}) + R_r \text{ (Resistência residual}^{38})$$

O como foi anteriormente referido cálculo destas resistências é complexo e demoroso. Em alternativa foram tidas em conta as provas de consumo (PMA 2 - O navio, pp. 9-5) e de velocidade (Corrida da milha), um dos tipos de prova realizados ao serem determinados os elementos evolutivos do navio, (PMA 2 - O navio, pp. 8-3) realizadas periodicamente pelos navios estudados. Estas provas estão descritas em pormenor na publicação que em suma estabelece em que condições devem de ser realizadas. Algumas das

<sup>36</sup> Estrutura metálica tubular ou fechada que normalmente excede em altura as superestruturas. Esta estrutura tem a função de suporte a vários equipamentos e sensores. (Marinha Portuguesa, pp. 1-9)

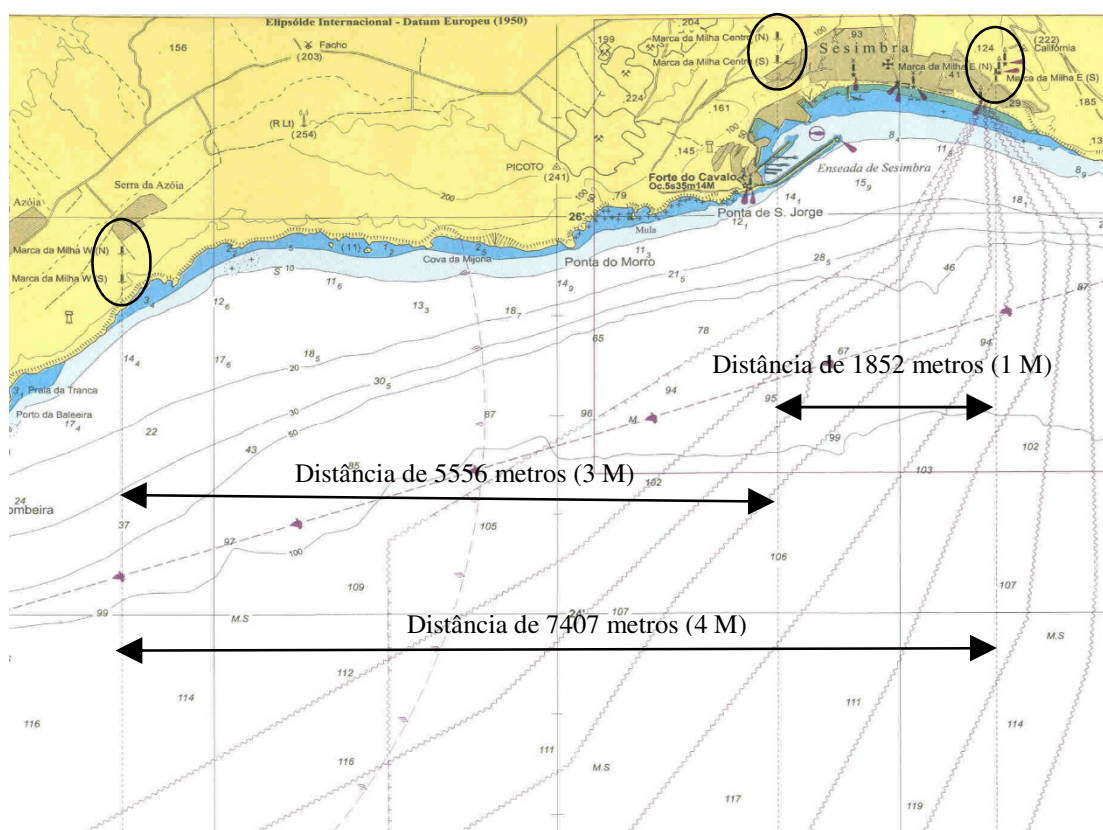
<sup>37</sup> Resistência definida por uma chapa plana de comprimento igual ao comprimento da linha de água do navio e área igual á superfície das obras vivas.

<sup>38</sup> Resistência residual é causa por todas as resistências não de atrito

condições referem-se à localização e as condições meteo-oceanográficas sentidas durante a realização das provas.

As provas de consumo são realizadas de modo a que seja determinado qual a variação do consumo com o tempo, a distância percorrida, a velocidade real ou a velocidade das máquinas de propulsão, permitindo assim o cálculo da autonomia. De modo a possibilitar a recolha destes dados é necessário ser variada apenas uma variável. Durante todo o teste devem ser mantidas a profundidade, o rumo e as condições atmosféricas.

A localização da corrida da milha como é possível observar na Figura 13 deve de ser o mais abrigada possível diminuindo assim os efeitos do vento e do mar, relativamente às condições meteo-oceanográficas estas deverão de ter a menor influência possível nos resultados obtidos, permitindo assim obter um maior rigor nas medições registadas e no cálculo efetuado.



*Figura 13- Corrida da uma milha (extrato da carta 26407- Sesimbra)*



Devido ao facto de serem feitas, não com um modelo mas com o navio em estudo no mar, as resistências de atrito já estão contempladas nas tabelas obtidas através da realização destas provas e da relação entre o regime das máquinas, o consumo e a velocidade dos navios é possível desenvolver o gráfico presente no Anexo 4, que representa o gráfico de consumos do NRP “Batista de Andrade”. No Anexo 5 está representada a tabela de consumos do NRP “Jacinto Cândido” utilizados na validação da aplicação.

A utilização deste gráfico permite, não só ter em conta as resistências como também relacionar o consumo real de combustível com a velocidade de avanço do navio.

Calculada a área vélica foi então necessário o efetuar o cálculo da pressão exercida pelo vento em cada uma destas faixas, para tal é deveria de ser utilizada a seguinte expressão:

*Equação 2 - Determinação da pressão em cada uma das faixas ( $P_i$ )*

$$P_i = C\rho \frac{V_i^2}{2g}$$

$C$ - coeficiente adimensional para cada tipo de navio.

$\rho$  - Densidade do Ar 1.025 [Kg/m<sup>3</sup>]

$g$ - aceleração da gravidade[m/s<sup>2</sup>]

$V_i$  - Velocidade do vento em nós. Assume-se que a velocidade nominal do vento ocorre 10 metros acima da superfície da água. [m/s]

$P_i$  - Pressão exercida pelo vento em cada uma das faixas [Kg/m<sup>2</sup>]

No entanto como não é conhecido o coeficiente adimensional será assumida a seguinte expressão:

*Equação 3 - Determinação da pressão ( $P_i$ ) quando é desconhecido o coeficiente adimensional*

$$P_i = 0.01195V_i^2$$

$V_i$  - Velocidade do vento em nós. Assume-se que a velocidade nominal do vento ocorre 10 metros acima da superfície da água. [m/s]

$P_i$  - Pressão exercida pelo vento em cada uma das faixas [Kg/m<sup>2</sup>]



Como as previsões obtidas através dos dados meteo-oceanográficas são disponibilizadas á altura de dez metros, logo não é necessário fazer a conversão das previsões (Integrated Climate Data Center, s.d.).

De seguida através da segunda lei de newton e comparando com a expressão da lei fundamental da pressão hidrostática e a segunda lei de newton temos:

*Equação 4 - Segunda lei de Newton*

$$F_{deslocamento}[N] = m_{navio}[N] \times a_{navio}[m/s^2]$$

*Equação 5 - Lei fundamental da hidrostática*

$$F_{criada na superficie}[N] = A_{vélica}[m^2] \times p_{vento}[Kg/m^2]$$

Como no momento considerado

$$\vec{F}_{criada na superficie}[N] = \vec{F}_{de reação}[N] = \vec{F}_{deslocamento}[N]$$

Partindo das equações 5 e 6 e tendo em conta as simplificações que foram assumidas é deduzida a seguinte expressão:

*Equação 6 - Cálculo da velocidade perdida do navio*

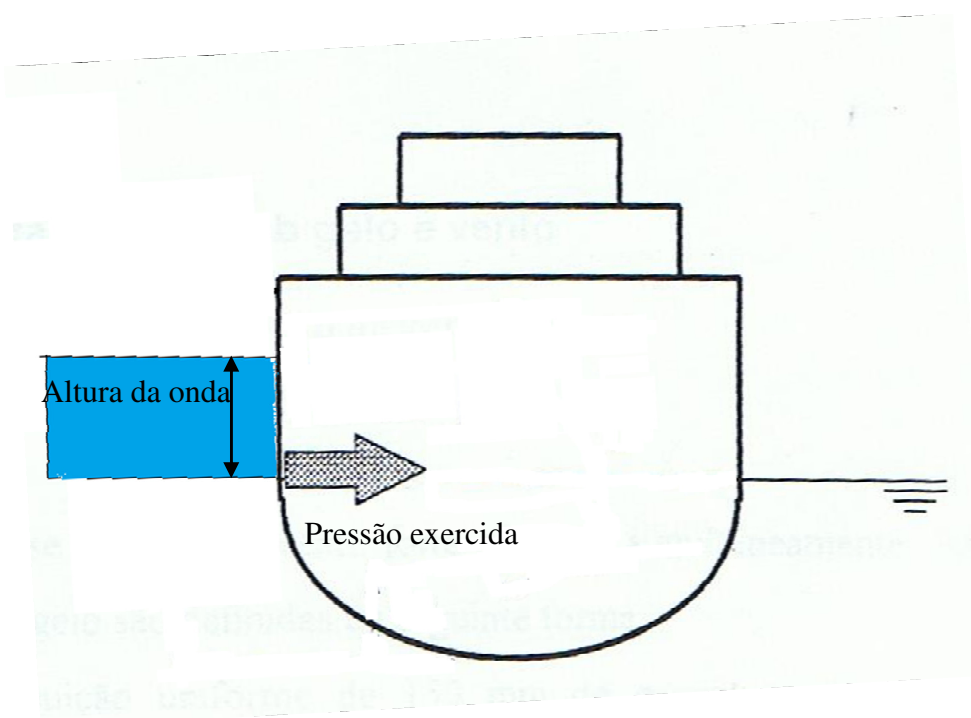
$$v_{navio}[m/s] = \frac{\sqrt{2 \times A_{vélica}[m^2] \times p_{vento}[Kg/m^2]}}{m_{navio}[N]} = \sqrt{\frac{0,039A[m^2]V_v[m/s]^2}{m[N]*0,514}}$$

Através da resolução desta expressão para todas as marcações possíveis do vento com um intervalo de seis graus e todas as velocidades dentro do intervalo dos zero aos noventa nós, é possível elaborar uma tabela com os valores da velocidade perdida pelo navio, esta está vertida no ficheiro “Perda de Velocidade - Vento.xlsx” 5, enquanto a visualização em forma de gráfico desta tabela está presente no Apêndice 5.

Para o cálculo do efeito da ondulação e vaga foi utilizado a mesma metodologia, ou seja, foi considerado apenas o momento em que a onda embate no navio. Foi desprezada a energia cinética da colisão entre a onda e o navio devido á falta de dados para a adoção dessa abordagem e foi apenas considerado que a superfície seria submersa até a altura da onda.

Ao invés de ser utilizada a Equação 6 para o cálculo da pressão foi utilizada a fórmula da pressão hidrostática por forma a ser calculada a força exercida na linha de água pelo

embate da onda. Torna-se ainda importante de referir que para este cálculo utiliza-se a informação do período e da direção da onda. Nos dados meteo-oceanográficos (encontra-se uma explicação pormenorizada da recolha destes dados no capítulo 4, secção 4.1) obtidos apenas é fornecido a soma da altura da ondulação com a altura da vaga. Quando o modelo dos ficheiros meteo-oceanográficos dispõe destes dados, caso do modelo WW3, é possível tratar a altura como mar total utilizando esses dados para o cálculo da perda de velocidade, quando o ficheiro não dispõe dessa informação, caso do modelo GFS, apenas é possível tratar a altura obtida como vaga sendo recorrido à Tabela 6 na página 47 para a obtenção do período, a direção adotada é a fornecida no ficheiro pelo vento.



*Figura 14 - Exemplificação da colisão da onda na superfície do navio*

Para o cálculo da pressão exercida pela onda foi utilizada a lei da pressão hidrostática para a água, sendo que a superfície do navio é tratada como se fosse a parede de um recipiente, em que na linha de água é exercida a pressão da onda. O período é utilizado para a repetição deste processo simulando assim o número de colisões.

*Equação 7 - Lei fundamental da hidrostática para a água*

$$P_{\text{colisão da onda}} = h_{\text{da onda}} \times g \times \rho_{\text{água}}$$

$h_{\text{da onda}}$  - Altura da onda [m]



$g$  – Aceleração da gravidade [ $m/s^2$ ]

$\rho_{\text{água}}$  – Densidade da água [ $Kg/m^3$ ]

$P_{\text{colisão da onda}}$  – Pressão na linha de água, no momento da colisão da onda [ $Kg/m^2$ ]

Com a resolução da Equação 7 para todas as direções é possível obter a tabela presente no ficheiro “Perdas de Velocidade - GFS.xlsx” e o gráfico no Apêndice 6 referentes á da vaga No ficheiro “Perdas de Velocidade – WW3.xlsx” encontram-se os valores calculados para os períodos de 5 a 10 segundos, para efeitos de teste da aplicação, visto serem estes os períodos registados nas observações da ondulação presentes em (Kotsch, 1983, pp. 214-220).

Devido ao facto do Oceano Atlântico não ter um nível de repouso adequado, não existem modelos baseados na aproximação geostrófica com o nível de confiança igual aos que existem para o Oceano Pacifico. Sendo que a perda de velocidade do navio se trata apenas de uma soma de vetores e como esta informação não se encontra disponível, a não ser a nível climatológico, esta variável não vai ser considerada para o cálculo da derrota ficando como oportunidade de melhoria do modelo.

Em suma, foi elaborada, a modelação expedita do perfil dinâmico do NRP “Baptista de Andrade”, através da simplificação do desenho do navio, da sua divisão em faixas e da determinação da área vélica. De seguida foram calculadas as perdas de velocidade derivadas da ação do vento, da vaga e da ondulação. Torna-se ainda importante lembrar que estes cálculos foram realizados com base em simplificações do modelo de comportamento hidrodinâmico do navio e têm o intuito de apenas atribuir aos fatores meteo-oceanográficas uma ordem de grandeza para seu uso no cálculo da derrota ótima.

### 3.2. Adaptação possível a outros navios

Após a elaboração da modelação foi necessário verificar para que navios é possível o uso desta modelação. Sendo o perfil hidrodinâmico dependente das principais dimensões do navio, esta modelação expedita não se pode aplicar a todos os casos, estando nesta secção algumas considerações sobre esta problemática.





O objetivo da modelação do navio centra-se no aumento do rigor do cálculo da derrota, consequentemente, ao ser usado o mesmo perfil noutra navio com acentuadas diferenças estruturais o cálculo irá perder rigor. Um exemplo deste caso é o do navio do tipo fragata, pois devido ao facto de ter um deslocamento maior, superestruturas com maior altura e mais área vélica será, mais afetado pelo efeito vento. Outros fatores como a existência dos estabilizadores também influenciam nos resultados do modelo. Apesar das formas da maioria das classes de navios da Marinha serem semelhantes, a ordem de grandeza do efeito dos fatores meteo-oceanográficos terão de ser alterados, o que implica uma nova modelação.

Não obstante de serem diferentes, navios como os da classe “João Coutinho” podem utilizar esta modelação, visto que estruturalmente são semelhantes. Os restantes navios da classe “Batista de Andrade” visto partilharem o mesmo desenho, também lhes é aplicável esta modelação. No entanto é necessário que sejam aplicados os respetivos gráficos de consumo.

Outros navios como o caso dos veleiros que possuem uma manobrabilidade menor vão sofrer mais os efeitos das condições meteo-oceanográficas pelo que carecem de uma modelação bastante mais rigorosa de modo a tornar o cálculo mais fiável.

### 3.3. Integração dos dados da modelação do perfil hidrodinâmico do navio na aplicação.

Com a secção da integração dos dados da modelação do perfil hidrodinâmico do navio na aplicação pretende-se explicar a sua função na aplicação e como são utilizados no cálculo.

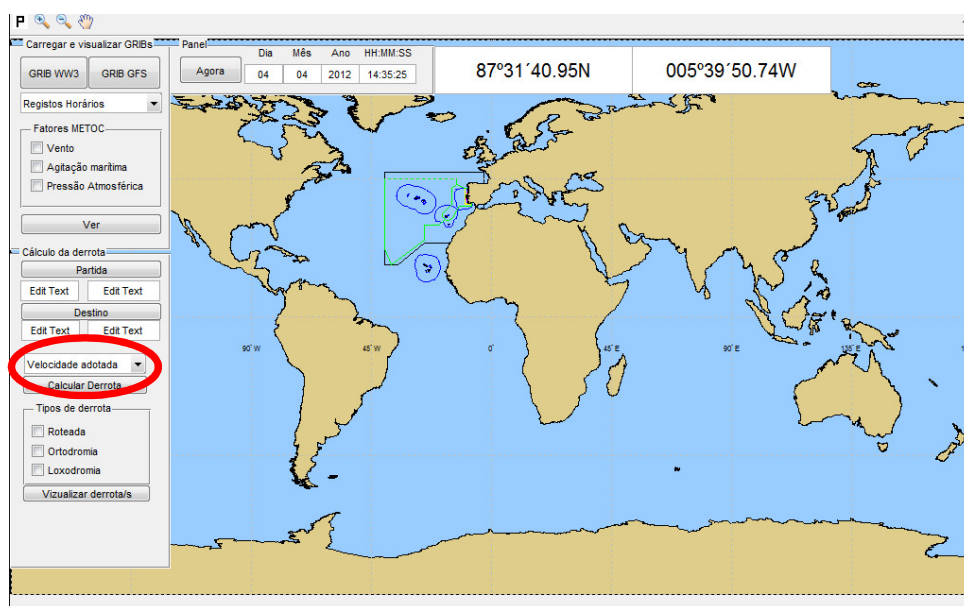
A integração dos dados na aplicação é realizada através da definição do efeito do vento e ondulação como variáveis vetoriais compostas pela marcação em relação ao navio e intensidade (em velocidade e altura respetivamente), os valores após a sua determinação são distribuídos na forma de matrizes e guardados nas variáveis “Vento” e “Ondas”.

Estas matrizes são utilizadas no seguimento do cálculo das marcações do vento e do mar total. Com a integração desta forma do perfil o cálculo está limitado aos azimutes definidos, pelo que é necessário a procura do valor mais próximo na matriz, tanto para a



marcação como para a intensidade. É ainda relevante afirmar que a componente WAVES fornecida em ambos os modelos é a soma da ondulação com a vaga (mar total), pelo que será tratada como vaga no modelo GFS, devido ao facto de não ser fornecido o período e a direção das ondas.

O gráfico de consumos também é carregado no como uma matriz sendo que neste caso, pode ser selecionada a velocidade adotada. Para o cálculo da derrota e de modo a possibilitar a introdução da velocidade adotada, foi elaborado um *pop-up menu* que se encontra representados na Figura 15.



*Figura 15 - GUI da aplicação com o pop-up menu "velocidade adotada" assinalado*

Foi demonstrado que apesar de a modelação ter algumas simplificações, como a discriminação em múltiplos de seis graus para as marcações do vento e da altura das ondas. É o facto de esta ter simplificações que possibilita efetuar o cálculo da ordem de grandeza dos efeitos causados pelos vários fatores meteo-oceanográficos, na velocidade do navio. Foi ainda descrito o procedimento adotado para esta modelação, desde a simplificação do desenho do navio, passando pela sua divisão em faixas com um metro de altura, o cálculo da pressão exercida na superfície do navio e por fim a determinação da velocidade perdida. Foi ainda descrito de que forma é integrada a informação na aplicação desenvolvida de modo a permitir o cálculo da derrota ótima.



## 4. ANALISE DOS DADOS METEO-OCEANOGRÁFICAS S

Neste capítulo são analisados os dados meteorológicos, é explicado como foram processados e qual a sua contribuição em conjunto com a resposta dos navios. Através destes dados é possível obter a informação necessária para permitir o cálculo da derrota.

### 4.1. Recolha de dados

De forma a fornecer dados corretos para o cálculo da derrota a ser percorrida pela plataforma é necessário obter os dados meteo-oceanográficos de uma forma rápida, fiável em qualquer parte do oceano.

A informação meteo-oceanográfica, deriva de dados em formato *Gridded Information in Binary* (GRIB). Estes ficheiros cumprem com as condições necessárias para a sua implementação na aplicação, visto serem dados compactos, com uma grande flexibilidade e facilidade de obtenção longe de costa através de um canal de acesso à internet (Singleton, s.d.).

Atualmente existem vários fornecedores de ficheiros GRIB, alguns destes disponibilizam gratuitamente previsões adequadas às necessidades dos marinheiros. Estes dados são facilmente adaptáveis, tanto em termo de escala como no tipo de informação disponibilizada.

Geralmente estes ficheiros são utilizados para troca de dados entre serviços de meteorologia de modo a estarem disponíveis a uma escala global, no entanto a maioria dos serviços não os disponibiliza aos utilizadores de forma livre.

Existem, apesar de tudo, alguma exceções, tal como a organização que fornece maioria dos GRIBs, a *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), especificamente o *National Center for Environmental Prediction* (NCEP), um dos líderes na *Numerical Weather Prediction* (NWP) e fornece os ficheiros a várias entidades, que por sua vez, redistribuem gratuitamente através de correio eletrónico, *browser* ou ainda *File Transfer*



*Protocol (FTP)* aos utilizadores, quer em terra quer no mar. A SailDocs, é uma das empresas que fornece este tipo de serviço à Marinha, são exemplos de aplicações que utilizam estes ficheiros a Monotorização contínua das atividades da pesca (MONICAP) e o Sistema de apoio á decisão para a atividade de patrulha (SADAP).

Segundo a NOAA estes ficheiros não são revistos antes de serem enviados aos utilizadores, logo não é dada qualquer garantia relativa aos dados cedidos, ficando ao cargo do utilizador, decidir até que ponto são credíveis. A intervenção de meteorologistas nas primeiras horas da previsão contribui para uma qualidade mais elevada do serviço prestado.

Existem vários modelos a serem utilizados como fontes pela SailDocs para a obtenção destes dados, sendo que nem todos são adequados a este trabalho. Estes modelos são os seguintes:

#### *Global Forecast System (GFS)*

Este modelo encontra-se disponível na resolução de  $0,5^{\circ} \times 0,5^{\circ}$  com um intervalo entre previsões de 3 horas e uma previsão máxima de até 192 horas, embora nos ficheiros GRIB apenas seja fornecido até 180 horas, podendo esta ser aumentada para 384 horas a uma resolução de  $2,5^{\circ}$  (NCWCP, 2013).

#### *Wavewatch III (WW3)*

O WW3 foi adotado pela NOAA como o modelo predileto para a modelação da ondulação, as previsões obtidas apresentam uma resolução de  $1,0^{\circ} \times 1,25^{\circ}$ , um intervalo de 3 horas entre previsões até um máximo de 180 horas. O modelo apresenta algumas limitações na sua utilização que é necessário ter presente quando são utilizados os dados dele extraído, estes dados podem apenas ser utilizados em águas oceânicas, esta limitação não tem influência neste trabalho visto só ser abordado o problema do roteamento meteorológico para rotas oceânicas (Marine Modeling and Analysis Branch, 2013).

#### *Navy Operational Global Atmospheric Prediction System (NOGAPS)*

Este modelo fornece dados sobre pressão e vento, numa resolução de  $1,0^{\circ} \times 1,0^{\circ}$  e um intervalo entre previsões de 3 horas até às T+24 horas, de 6 horas até á previsão das T+96 horas e por fim de 12 horas até a previsão T+144 horas. Os utilizadores do serviço fornecido pela SailDocs utilizam este modelo como uma alternativa ao modelo GFS.



*Coupled Ocean/Atmosphere Mesoscale Prediction System (COAMPS)*

Como o nome indica este modelo fornece uma maior resolução, cerca de  $0,2^\circ \times 0,2^\circ$ , com um intervalo entre previsões de 3 horas até um máximo de 62 horas. Este modelo utiliza o modelo NOGAPS como base e está disponível para três regiões, a região do Pacífico leste, a região do Atlântico oeste e a região das Caraíbas e América central, pelo que não pode ser utilizado como fonte de dados na aplicação (NSR, 2013).

Para este trabalho foram primeiramente requisitados dados do modelo GFS, mas devido ao facto de não incluírem todas as componentes procedeu-se à conversão do código, através da procura, no ficheiro, das componentes relativas ao período e à direção da ondulação e a posterior criação de duas novas variáveis que vão alojar as informações relativas a cada componente, possibilitando assim a utilização dos dados fornecidos pelo modelo WW3. Embora com menor resolução, este processo permite a integração da componente do mar total no cálculo da derrota, esta componente já tem a direção e o período. Outras vantagens deste modelo prendem-se com a sua utilização prática, visto que, como tem uma resolução mais pequena, os pontos do grafo estão mais afastados, logo haverá menos iterações para o cálculo do rumo, impedindo uma maior segmentação da derrota, naturalmente, esta de simplificação introduz um menor esforço computacional.

A requisição dos dados GRIB foi realizada através de correio eletrónico. A solicitação é feita segundo um determinado protocolo, que consiste na apresentação do formato dos dados necessários, seguido das mensagens utilizadas para a requisição à SailDocs.

Para o modelo GFS foi enviado para a SailDocs a mensagem exposta na Tabela 4,

*Tabela 4- Tabela explicativa da mensagem de solicitação de ficheiros GRIB à SailDocs (GFS)*

Modelo escolhido	Limites em geográficos	Resolução dos dados	As horas da previsão a partir da hora da execução do modelo	O tipo de dados requeridos
GFS.	43N,35N, 9W,35W	10.5,0.51	0,3,6,9,12,15,18,21,24,27,30,33,36,39,42,45,48,51,54,57,60, 63,66,69,72,841	PRESS <sup>39</sup> , WIND <sup>40</sup> , WAVE S <sup>41</sup> , AIRTEMP <sup>42</sup> , APCP <sup>43</sup> ”

<sup>39</sup> Pressão atmosférica.

<sup>40</sup> Componente vetorial do vento.

<sup>41</sup> Altura da ondulação.

<sup>42</sup> Temperatura do ar.

<sup>43</sup> Precipitação no local.



Como é possível verificar neste pedido, embora o ficheiro tenha as componentes WAVES e WIND não dispõe de todos os dados necessários, nomeadamente o período das ondas e a respetiva direção. Outro fator que justifica a mudança de modelo é a resolução dos dados na componente WAVES que não coincide com os registos do vento, pois estes são obtidos a partir do modelo WW3, provocando uma perda de resolução.

Para a solicitação com base no modelo WW3 foi enviada a mensagem, apresentada na Tabela 5, com os seguintes parâmetros

*Tabela 5 - Tabela explicativa da mensagem de solicitação de ficheiros GRIB à SailDocs (WW3)*

Modelo escolhido	Limites em geográficos	Resolução dos dados	As horas da previsão a partir da hora da execução do modelo	O tipo de dados requeridos
WW3	43N,35N,30W,7W	11.0,1.0 <sup>44</sup>	0,3,6..48h	WIND,HTSGW <sup>45</sup> ,WVDIR <sup>46</sup> ,WVPER <sup>47</sup>

Com a análise desta mensagem é possível verificar que embora a resolução dos dados tenha diminuído de 0.5°x0.5° para 1.0°x1.25° estes já têm as componentes necessárias para a correta utilização da modelação elaborada no capítulo anterior.

De modo a permitir a utilização dos dados provenientes tanto do modelo WW3 como do modelo GFS foi criada na aplicação a opção de serem carregados os dois tipos de GRIBs, sendo que com a utilização deste último a ondulação é tratada como vaga segundo os períodos expostos na Tabela 6. A tabela foi elaborada com base nas observações registadas em (Kotsch, 1983, pp. 214-220), não permitindo uma simulação tão rigorosa como a que utiliza os GRIBs provenientes do modelo WW3.

<sup>44</sup> Embora seja solicitado com a resolução de 1.0°x1.0° é fornecido com a resolução de 1.0°x1.25°.

<sup>45</sup> Altura significativa da vaga e ondulação somadas.

<sup>46</sup> Direção da ondulação e vaga.

<sup>47</sup> Período da ondulação e vaga.



*Tabela 6- Período adotado para a vaga dependente da força do vento na escala de Beaufort*

Força na escala de Beaufort (Força)	Velocidade do vento (Nós)	Período Adotado (Segundos)
0, 1, 2, 3, 4	<1 a 16	5
5 , 6 e 7	17 a 33	6
8 e 9	34 a 47	7
10	48 a 52	9
11 e 12	> 53	Indefinido

De modo a obter uma simulação mais fiável e embora sejam fornecidos “ficheiros de quinze dias é recomendado a utilização até ao oitavo dia”<sup>48</sup> (Singleton, s.d.), a partir deste dia a probabilidade das previsões serem fiáveis é demasiado baixa para serem consideradas.

Após ter sido exposto o modelo que melhor se adapta ao problema em questão, ou seja, o WW3 e a descrição do processo de requisição á SailDocs dos ficheiros GRIB, será de seguida descrito o seu processo de transformação em variáveis.

#### 4.2. Integração dos dados GRIB na aplicação

O objetivo principal desta secção é a exposição do processo de transformação dos dados GRIB, que em conjunto com os dados da reação do navio, serão convertidos em informação necessária para o cálculo, por parte da aplicação, da derrota otimizada

De modo a facilitar a compreensão da integração destes dados na aplicação encontra-se no Apêndice 7 o esquema resumo da preparação da variável “custos” para o algoritmo, com o mesmo objetivo encontra-se no fim deste capítulo o processo de carregamento dos ficheiros GRIB.

O facto da informação, necessária para o cálculo da derrota, ser criada a partir dos ficheiros GRIB vai ser responsável pela resolução, no caso dos ficheiros provenientes do

---

<sup>48</sup> “Output is available up to 15 days ahead although I would only recommend using up to 8 days”

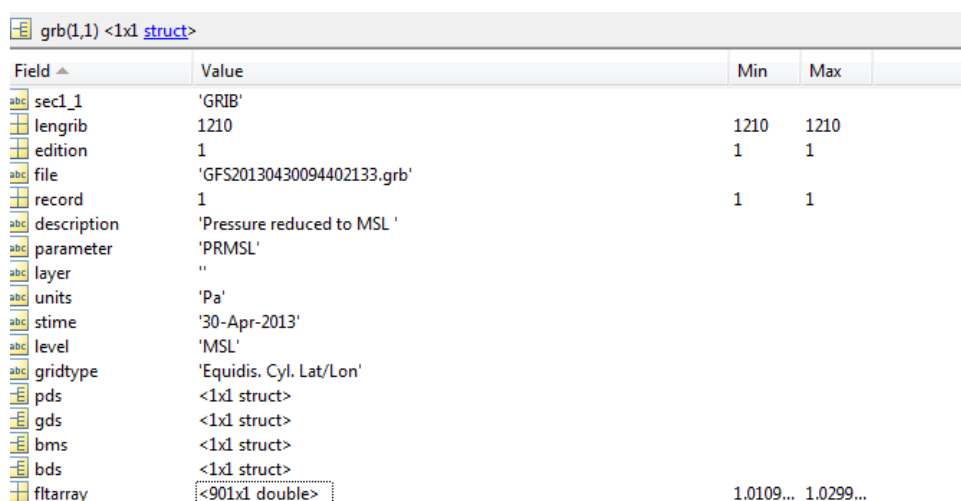


modelo GFS, os pontos estão espaçados em intervalos de  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ , enquanto no modelo WW3 a resolução é de  $1.0^\circ \times 1.25^\circ$ .

Em relação á duração da viagem esta vai ser definida no intervalo das previsões, caso estas ultrapassem o tempo das previsões, será utilizada a última previsão até o final da viagem. No caso dos pontos de partida e de chegada, são sempre adaptados ao registo GRIB mais próximo.

Os ficheiros GRIB, como referenciado anteriormente, são ficheiros binários, impossibilitando a sua leitura direta com o MATLAB, assim sendo foi necessária a utilização de um suplemento que permitiu a sua transformação em uma variável num formato compatível com o MATLAB.

Com este objetivo em mente foi utilizado o suplemento READ\_GRIB (versão 1.4). Trata-se de uma *TOOLBOX* desenvolvida pela WMO amplamente utilizada por instituições internacionais ligadas á meteorologia como por exemplo a NOAA, a Weather Services International Inc. (WSI) e o Nanjing Institute of Meteorology, entre outras.



Field	Value	Min	Max
sec1_1	'GRIB'		
lengrib	1210	1210	1210
edition	1	1	1
file	'GFS20130430094402133.grb'		
record	1	1	1
description	'Pressure reduced to MSL '		
parameter	'PRMSL'		
layer	'		
units	'Pa'		
stime	'30-Apr-2013'		
level	'MSL'		
gridtype	'Equidis. Cyl. Lat/Lon'		
pds	<1x1 struct>		
gds	<1x1 struct>		
bms	<1x1 struct>		
bds	<1x1 struct>		
fitarray	<901x1 double>	1.0109...	1.0299...

Figura 16 - Visualização de um ficheiro GRIB carregado através do suplemento READ\_GRIB no MATLAB

Com a utilização deste suplemento é possível a conversão do ficheiro GRIB numa variável do tipo STRUCT<sup>49</sup> (esta ação corresponde ao passo 1 na Figura 19) como a que é possível visualizar na Figura 16. Sendo que na sua forma mais básica este ficheiro é composto por várias tabelas onde estão designados os parâmetros das várias componentes

<sup>49</sup> Variável estruturada com vários objetos identificados



requeridas. A fase seguinte vai procurar e arranjar os dados de modo a obter um formato do tipo to tipo DOUBLE<sup>50</sup>, como é possível observar na Figura 17. Este processo (corresponde ao passo 2 na Figura 19) permite assim a utilização dos dados pela aplicação desenvolvida.

Identificador	Latitude	Longitude	Força do vento	Direção do vento	Altura da ondulação + vaga	Direção da ondulação + vaga	Período da ondulação + vaga	9
2	2	35	-28.7500	6.0723	42.5974	1.8000	84.5100	8.2000
3	3	35	-27.5000	7.2610	33.7120	1.8900	75.9400	7.8500
4	4	35	-26.2500	8.3323	36.3610	1.9800	66.3500	7.4900
5	5	35	-25	8.0997	43.3491	2	62.7500	7.3900
6	6	35	-23.7500	8.0498	48.7270	2.0400	58.6200	7.3100
7	7	35	-22.5000	8.1563	46.6394	2.0700	52.6200	7.2700
8	8	35	-21.2500	8.0116	45.2528	2.0700	48.4100	7.3000
9	9	35	-20	7.8136	44.8444	2.0600	44.6200	7.3200
10	10	35	-18.7500	7.8097	46.6603	2.0400	40.1300	7.2800
11	11	35	-17.5000	7.9726	48.8141	2	34.0900	7.0600
12	12	35	-16.2500	7.8239	47.9529	1.9100	27.2900	6.6500
13	13	35	-15	7.5065	43.1106	1.8500	21.8000	6.6200
14	14	35	-13.7500	7.4690	35.2434	1.7700	15.1400	6.6100
15	15	35	-12.5000	7.8440	32.0286	1.6700	7.8400	6.5600
16	16	35	-11.2500	7.6236	41.3839	1.6000	4.3600	6.6400
17	17	35	-10	6.8314	55.7982	1.5700	6.9000	6.8100

Figura 17- Extrato da variável “data\_derrota” obtida através da conversão do ficheiro GRIB

Com o uso de um código fornecido pela Direção de Análise e Gestão de Informação pelo 1TEN Gonçalves Deus e o uso do suplemento READ\_GRIB foi possível efetuar a conversão de um modo simples e eficaz.

Várias ferramentas traduzem os dados em binário para uma imagem com a informação necessária, para o seu uso, são exemplos destes *softwares* o Zgrib e o Ugrib, sendo estes também utilizados na Marinha.

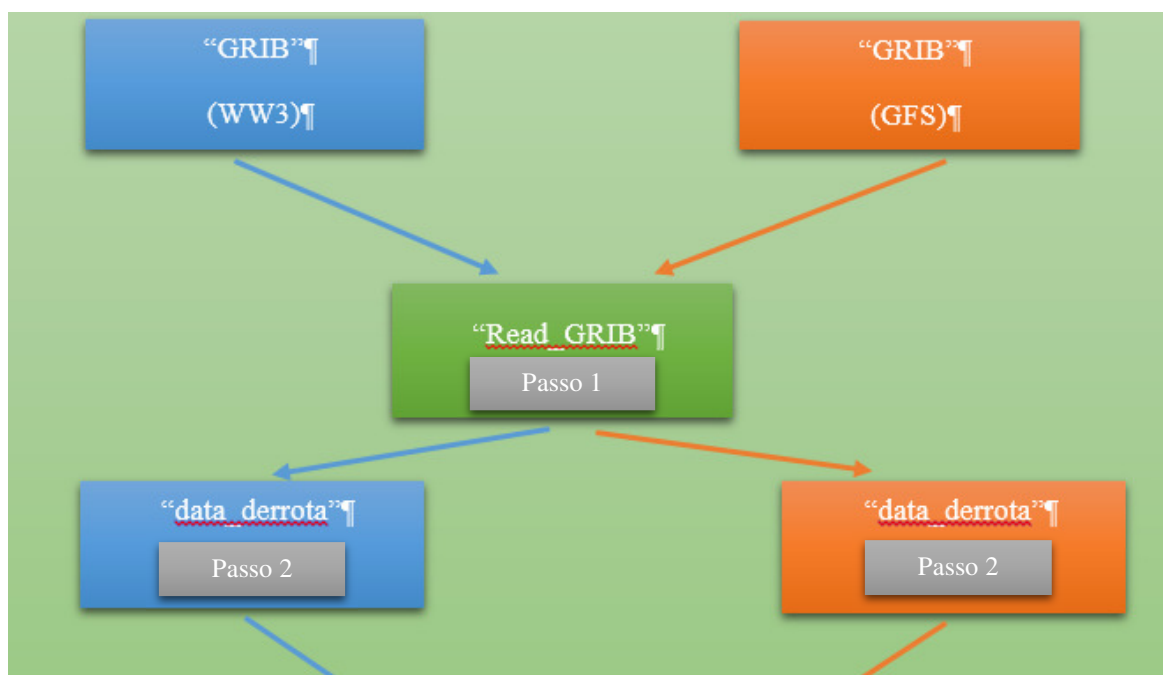
Foi também fornecido pelo 1TEN Gonçalves Deus juntamente com o código de conversão do ficheiro GRIB, um código que permite a visualização destes dados de um modo mais simples, na Figura 18 é possível visualizar a representação do parâmetro “WIND” na aplicação.

<sup>50</sup> Variável com capacidade de suportar números decimais.





*Figura 18- Representação da componente WIND do ficheiro GRIB carregado no MATLAB*



*Figura 19 - Esquema resumo do carregamento dos ficheiros GRIB*

Em suma foram apresentadas as características dos ficheiros GRIB, explicado o modo como foram solicitados à SailDocs, caracterizados os modelos em que se baseiam. Foram escolhidos os ficheiros provenientes dos modelos GFS e WW3 pelas informações neles contidos e pela sua resolução, é importante reter que independentemente da qualidade da aplicação se os dados meteo-oceanográficas não forem os adequados a aplicação deixa de ter utilidade. Foi explicada como se integram na aplicação desde o recurso ao suplemento



## *Otimização das derrotas dos navios do tipo corveta*

READ\_GRIB para a conversão dos ficheiros GRIB, a visualização dos ficheiros permitindo uma melhor compreensão do panorama e como são utilizados para o cálculo da derrota.



## 5. NAVEGAÇÃO

Este capítulo dá a conhecer ao leitor a base teórica sobre a qual assenta a aplicação. É explicada a metodologia utilizada para a determinação das derrotas de modo a permitir uma melhor perceção do cálculo da derrota ótima e das suas limitações.

. Os vários tipos de navegação diferenciam-se principalmente no rigor da obtenção da posição do navio e por consequência na frequência com que esta é obtida, contribuindo para a condução segura do navio. Outro facto importante que permite diferenciar os tipos de navegação é a escala e o pormenor das cartas a serem utilizadas.

A navegação em águas restritas, utilizada na entrada e saída de portos, rios, barras e nas suas proximidades, ou seja, onde o navio esteja limitado em termos de manobra, com o perigo mais próximo dentro de um raio de 3 milhas. Os pontos neste tipo de navegação devem de ser marcados o mais frequentemente possível e com o máximo de rigor. A aplicação desenvolvida não tem aplicabilidade para a navegação em águas restritas (tendo em conta a resolução dos ficheiros GRIB ser insuficiente para o seu uso nestas condições).

A navegação costeira é efetuada geralmente entre as 50 e as 3 milhas do perigo mais próximo, os pontos devem de ser marcados com um intervalo de 20 a 5 minutos e podem ter um erro máximo de 400 metros (0,22 milhas). As cartas neste tipo de navegação devem de ter pormenor suficiente para permitir a prática da geonavegação<sup>51</sup>. Neste tipo de navegação a aplicação pode ainda pode ser útil embora o ganho em termos de um menor consumo irá ser menor, devido à extensão das tiradas normalmente praticadas, outra limitação, prende-se com a falibilidade de dados meteo-oceanográficos, pois derivam de modelos globais, não sendo adequada para zonas costeiras.

A navegação oceânica de uma forma geral, é utilizada a mais de 50 milhas do perigo mais próximo, a marcação do ponto depende da velocidade do navio e da missão em que este esta empenhado, sendo o erro aceitável da posição de 3700 metros (2 milhas). É principalmente para este tipo de navegação que este trabalho se vai revelar útil, uma vez que, é nas viagens oceânicas que se espera obter uma economia no consumo de combustível e tempo de viagem. Hoje em dia com a utilização de sistemas de radioposicionamento por

---

<sup>51</sup> Método de controlo de posição através de linhas de posição, visuais ou radar a conhecenças ou pontos conspícuos.



satélite (como por exemplo o GPS<sup>52</sup> e o GLONASS<sup>53</sup>), é possível obter permanentemente informação de navegação tal como posição, hora e velocidade, de forma rigorosa e fiável.

### 5.1. Tipos de Derrota e a sua Utilização

Nesta secção são definidas os diferentes tipos de derrota, a sua utilização na marinha, a sua aplicação, vantagens e desvantagens de cada tipo.

Numa navegação entre dois portos, um porto de chegada e um porto de partida, podem existir uma ou mais derrotas, Estas são compostas por um ponto de partida, situado em águas safas<sup>54</sup> e um ponto de chegada, também em águas safas. A distância entre os dois portos designa-se por tirada.

Existem vários tipos de derrota, podem ser utilizadas derrotas loxodrómicas, ortodrómicas ou roteadas para a navegação entre vários pontos no globo. Para cada um destes tipos de derrota existem cartas e projeções apropriadas.

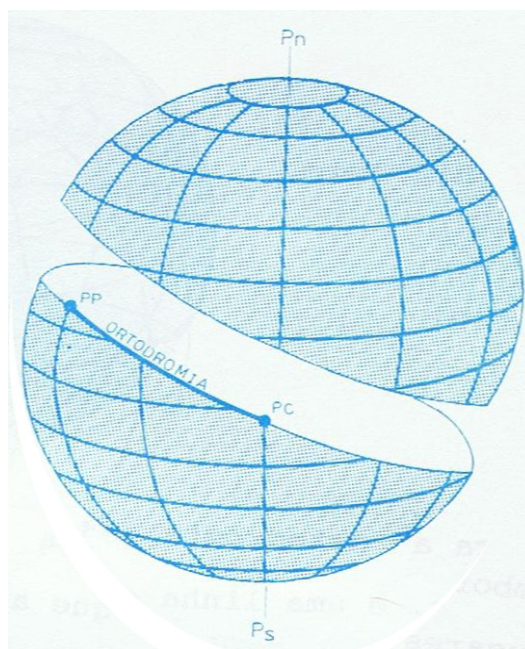
A derrota ortodrómica ou a ortodromia é representada através do arco de círculo máximo, ou seja, trata-se da distância mais curta entre dois pontos na superfície do globo. Na Figura 20 encontra-se uma representação de uma ortodromia.

---

<sup>52</sup> Global Positioning System (Estados Unidos da América)

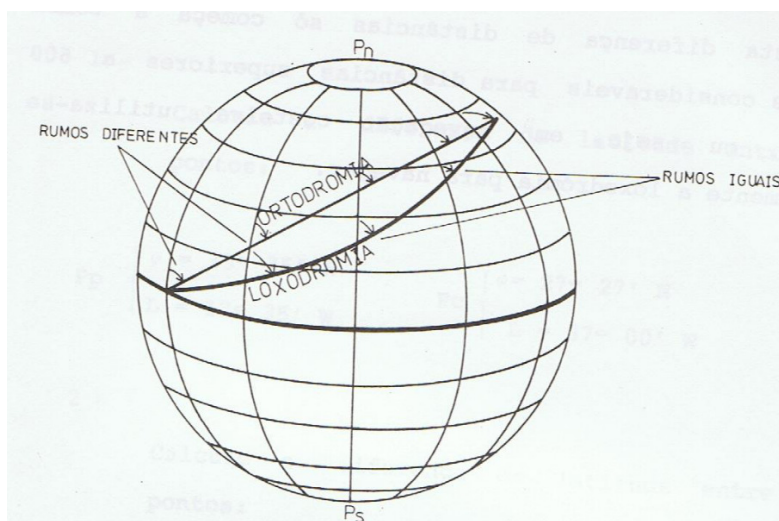
<sup>53</sup> *Globalnaya navigatsionnaya sputnikovaya sistema* (Russia)

<sup>54</sup> Águas cujo perigo mais próximo se encontra a mais de 1000 jardas.



*Figura 20- Derrota ortodrómica executada entre o PP-ponto de partida e PC-ponto de chegada (Escola Portuguesa de Pesca, 1989, p. 37)*

A derrota loxodrómica ou simplesmente loxodromia, ao contrário da ortodromia, cruza os meridianos com um ângulo constante. Embora não seja a distância mais curta, para a navegação acaba por ser a mais utilizada devido à simplicidade da sua representação nas cartas de Mercator. Na Figura 21 é representada uma comparação entre as duas derrotas abordadas. É possível verificar que enquanto a ortodromia é percorrida com recurso a rumos diferentes, a loxodromia será percorrida com um rumo constante.



*Figura 21- Comparação entre derrota loxodrómica e ortodrómica (Escola Portuguesa de Pesca, 1989, p. 39)*



A derrota roteada é uma derrota calculada através de aplicações e/ou serviços que vai ter em conta vários fatores como as condições meteo-oceanográficas, a condição socioeconómica ou de segurança, como o ocorre atualmente nas zonas de conflito ou de elevado risco de pirataria, Outro elemento necessário é a resposta do navio a essas condições, a distância percorrida e os diferentes consumos de combustível às várias velocidades praticadas, estas derrotas são simplificadas de modo a ser possível a sua representação gráfica nas cartas. Como exemplo é visível na Figura 22 o traçado deste tipo de derrota.

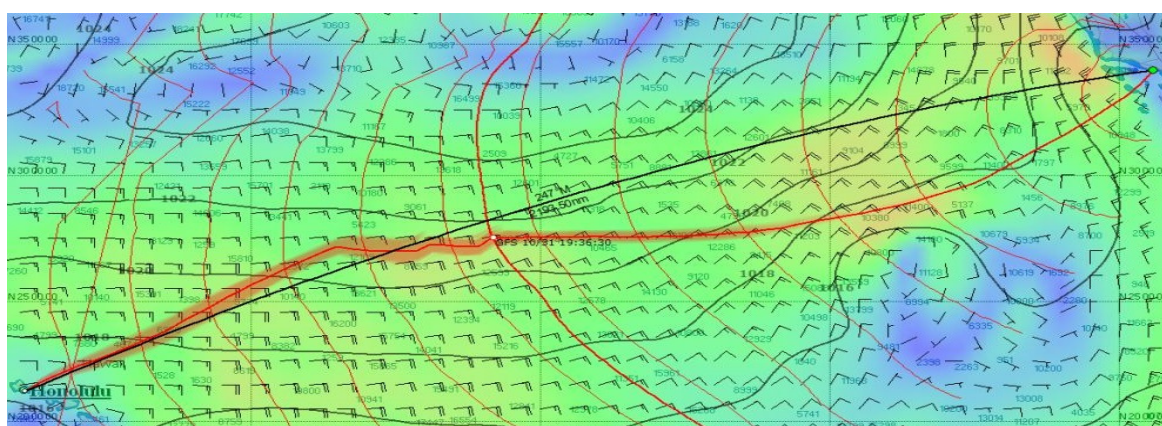
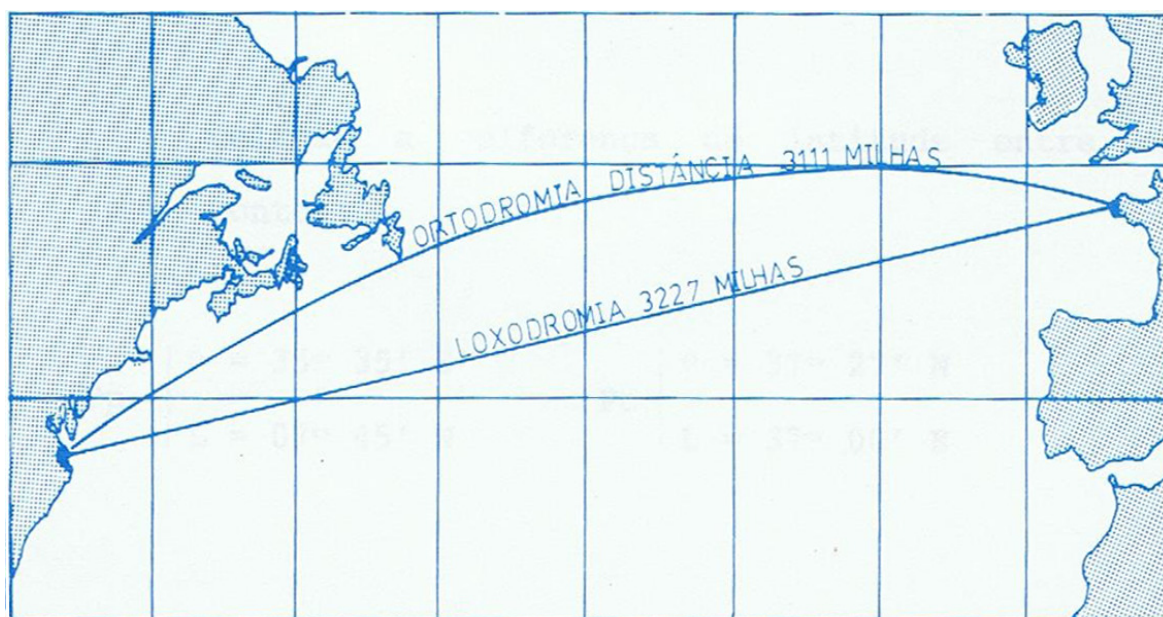


Figura 22- Comparação entre uma derrota roteada e uma derrota ortodromia (<http://www.expeditionmarine.com/>)

A seleção do tipo de derrota depende das características do navio, da sua *performance*, das condições externas ao navio como as condições meteo-oceanográficas, o cumprimento do Regulamento Internacional para Evitar Abalroamentos no Mar, e da experiência do navegante aplicada na escolha da derrota e na condução do navio.

Em viagens oceânicas, como por exemplo uma viagem de Brest para Nova Iorque (exemplo da Figura 23), é necessário pesar as vantagens de cada tipo de derrota por forma praticar a viagem eficientemente.



*Figura 23 - Comparação entre a derrota loxodrómica e ortodromia (Escola Portuguesa de Pesca, 1989, p. 39).*

De seguida estão expostas sucintamente as vantagens e desvantagens da pratica de cada tipo de derrota, assim como qual o tipo de viagem a que estão associadas.

A principal vantagem da derrota ortodrómica é a de corresponder ao caminho mais curto. É utilizada em viagens longas devido ao diferencial das distâncias quando comparada com os restantes tipos de derrota. Com grandes diferenças de longitude esta diferença é mais evidente, este facto é possível de ser verificado através da observação do exemplo dado na Figura 23 onde a derrota ortodrómica apresenta um ganho de 116 milhas náuticas em relação á derrota loxodrómica. No entanto a sua representação na carta de Mercator, como de pode verificar na mesma Figura 23 e na Figura 24, é a sua grande desvantagem. Por vezes o traçado da derrota passa por latitudes mais elevadas onde as condições meteo-oceanográficas não são as mais favoráveis. Noutras situações ocorre a passagem, a meio da tirada, por massas de terra, nomeadamente ilhas tornando os novos cálculos ainda mais complexos de modo a evita-las.

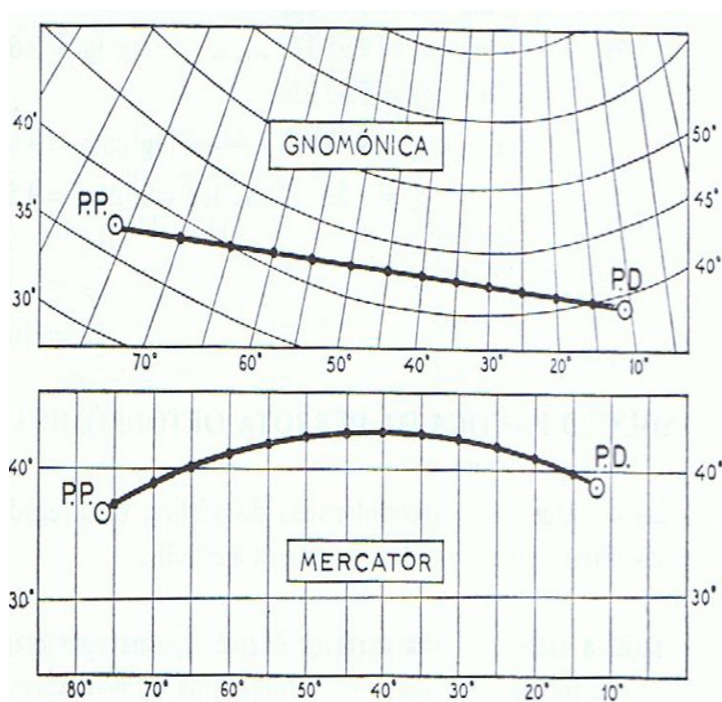


Figura 24- Representação de ortodromias nas projeções gnomónica e de Mercator (Instituto Hidrográfico, 1989)

Para facilitar o uso destas derrotas é aconselhado o uso do “Ocean passages of the world”, nesta publicação estão desenhadas as derrotas ortodrómicas mais utilizadas pelos navios, estas serão depois divididas em várias loxodrómicas e marcadas nas cartas de Mercator.

No planeamento deste tipo de derrota não são consideradas as condições meteo-oceanográficas, pelo que é necessário a constante correção da proa de modo a sofrer menos os seus efeitos.

A derrota loxodrómica é utilizada para pequenas tiradas. Representada por uma reta na carta de Mercator (Figura 23), tem como principal desvantagem o facto de ser uma tirada maior que a da ortodromia. À semelhança da ortodromia não são consideradas no seu cálculo as condições meteo-oceanográficas, tornando-se necessária durante a sua prática a correção constante das proas de modo a conseguir percorrer o rumo e permitindo assim que a plataforma e guarnição não sofram com condições adversas. Relativamente ao encontro de massas de terra a meio de tiradas, a prática desta derrota é bastante mais flexível e simples, tanto no seu cálculo como no seu traçado.





A condução da plataforma torna-se bastante mais simples, sendo que apenas é necessário compensar a deriva do navio. Como regra prática são usadas loxodrómicas até distâncias de 600 milhas, valor a partir do qual e devido ao ganho em distância são praticadas as derrotas ortodrómicas.

A derrota roteada veio integrar várias vantagens e desvantagens das derrotas ortodrómicas e loxodrómicas, visto que também deve de ser utilizada para grandes tiradas. Esta pode ainda ser utilizada para tiradas mais curtas caso as condições meteo-oceanográficas sejam extremas. Devido ao facto de atualmente estas serem calculadas com recurso á computação, funciona como uma vantagem, visto não ser necessário o utilizador fazer quaisquer cálculos analíticos. No entanto apresenta também uma desvantagem, requer uma maior capacidade computacional no navio e caso este falhe é necessário recorrer a o uso da derrota ortodrómica ou loxodrómica para a condução da plataforma.

Em relação á distância percorrida esta derrota não será a mais curta, mas como foi previamente exposto, nem sempre o caminho mais curto é o mais económico. O traçado na carta vai depender do serviço adotado, visto vários serviços simplificarem as derrotas desenvolvidas com várias loxodromias, estas vão ter as mesmas desvantagens embora no seu conjunto ser descrito um caminho próximo do mais curto. Individualmente vão descrever um caminho um pouco mais longo que a equivalente ortodromia, no entanto com o aumento do número de loxodromias cresce também a aproximação á derrota otimizada, esta diferença em termos de distância é baixa comparada com os recursos energéticos gastos para percorrer os trajetos dos restantes tipos de derrotas.



## Otimização das derrotas dos navios do tipo corveta

Na tabela seguinte é possível visualizar resumidamente as vantagens e desvantagens dos diferentes tipos de derrotas.

Tabela 7- Vantagens e desvantagens dos tipos de derrotas

<i>Caraterísticas</i>	<b>Ortodrómica</b>	<b>Loxodrómica</b>	<b>Roteada</b>
<i>Distancia</i>	Mais curta	Longa	Perto da mais curta
<i>Dificuldade do traçado na carta de Mercator</i>	Complexo	Simple	Complexo
<i>Condução da plataforma seguindo a derrota</i>	Complexa <sup>55</sup>	Simple	Simple
<i>Uso de recursos energéticos<sup>56</sup></i>	Medio	Elevado	Baixo
<i>Cálculo relativo às condições meteo-oceanográficas<sup>57</sup></i>	Não é efetuado	Não é efetuado	Efetuada em cada vértice
<i>Flexibilidade da derrota</i>	Baixa	Alta	Alta
<i>Complexidade dos cálculos</i>	Média	Baixa	Alta
<i>Conforto</i>	Medio	Medio	Alto
<i>Segurança</i>	Medio	Media	Alta
<i>Duração da viagem</i>	Medio	Baixa	Alta

Pela análise da tabela e tendo em perspetiva a atual conjuntura do país é possível concluir que é válido o desenvolvimento de competências por parte da Armada para o uso do tipo de derrotas roteadas, havendo margem para o desenvolvimento desta faculdade.

Na Armada são utilizados dois tipos de derrota, nomeadamente as loxodromias e as derrotas roteadas, sendo estas ultimas praticadas de uma forma diferente da apresentada nesta dissertação.

<sup>55</sup> A condução é sempre dependente da competência e experiencia do OQP.

<sup>56</sup> Relativas entre os diferentes tipos de derrota.

<sup>57</sup> Referente ao cálculo analítico.



O uso de loxodrómicas é praticado por todos os navios, é comum o seu uso nos planeamentos, mesmo em viagens de grandes distâncias como por exemplo de Lisboa para os Açores ou para a Madeira.

Na sua condução o que acaba por acontecer é uma variante das derrotas roteadas, visto que estas partem de uma loxodrómica que é adaptada em função do estado do mar que se verifica na previsão ou se faz sentir no momento. Estas derrotas vão depender bastante da experiência e profissionalismo dos OQPs das unidades ao invés de serem planeadas com base num modelo computacional e na distância mais curta e uma previsão meteorológica de modo a obter os melhores resultados.

Concluindo é possível constatar que embora a prática adotada para a determinação da derrota seja um pouco mais eficiente, que o uso da loxodromia, não o são suficientemente para alcançar os objetivos pretendidos.

É importante referir que os navios com uma grande manobrabilidade e capacidade propulsora como as fragatas, corvetas e lanchas reagem melhor às condições desfavoráveis do que os navios como o NRP “Sagres” e o Navio de Treino de Mar (NTM) “Creoula”. Sendo estes mais vulneráveis, implicando que nestes haja uma maior preocupação com os fatores meteorológicos no planeamento da sua navegação.

## 5.2. Cálculos Náuticos

Nos cálculos náuticos é explicado como é construído o grafo para a resolução do problema, assim como como é obtida a matriz com as distâncias cada vértice e os seus adjacentes.

A abordagem adotada para a resolução do problema baseou-se no problema do “caixeiro-viajante” como foi anteriormente referido, de modo a permitir o uso do algoritmo de Dijkstra surgiu a necessidade da criação de um grafo.

Um grafo trata-se de uma rede de vértices, onde cada um destes vértices tem uma identificação e uma posição. Para permitir a resolução destes problemas são criados arcos



entre os vértices. Cada arco é definido pela distância ou custo da passagem de um vértice para outro.

No caso deste trabalho o grafo desenvolvido encontra-se limitado na área SRR Lisboa e SRR Santa Maria, este limite pode ainda ser reduzido de modo a tornar a simulação mais rápida. Nos casos estudados no Capítulo 7 foram reduzidos os limites dos ficheiros GRIB solicitados com este mesmo objetivo.

O recurso aos ficheiros GRIB permite uma resolução de  $0,5^{\circ} \times 0,5^{\circ}$  com a utilização do modelo GFS e de  $1,0^{\circ} \times 1,25^{\circ}$  com o modelo WW3, os vértices criados estão alinhados com os meridianos e os paralelos, facilitando assim a sua representação gráfica para o caso de existir a necessidade de serem marcados. Assim sendo foi criada uma matriz que representa a informação contida em cada vértice. Esta matriz contém todas as informações de cada vértice sendo possível visualizar um excerto desta na Figura 25, esta variável tem a designação de “data\_derrota”.

Identificador		Latitude	Longitude	Velocidade do vento	Direção do vento	Altura da ondulação + vaga	Direção da ondulação + vaga	Período da ondulação + vaga	9
130	130	41	-11.2500	11.0864	12.8203	2.1300	357.5500	6.4500	
131	131	41	-10	11.1602	4.2136	2.2500	349.0700	6.3800	
132	132	41	-8.7500	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	
133	133	41	-7.5000	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	
134	134	42	-30	5.6015	178.6702	1.4500	259.4800	9.0900	
135	135	42	-28.7500	4.8113	183.9329	1.3800	266.6700	9.1300	
136	136	42	-27.5000	3.5971	185.5838	1.3200	274.1600	9.2900	
137	137	42	-26.2500	2.4636	187.9328	1.3500	270.2000	10.0600	
138	138	42	-25	1.5483	208.5514	1.3400	274.7500	10.0900	
139	139	42	-23.7500	0.9563	248.5323	1.4000	271.4800	10.6200	

Figura 25-Excerto da variável “data\_derrota”

Na Figura 26 é possível visualizar um par de vértices e o arco. Os vértices têm várias informações, sendo que para o cálculo dos arcos são tidas em conta as características do vértice de partida.

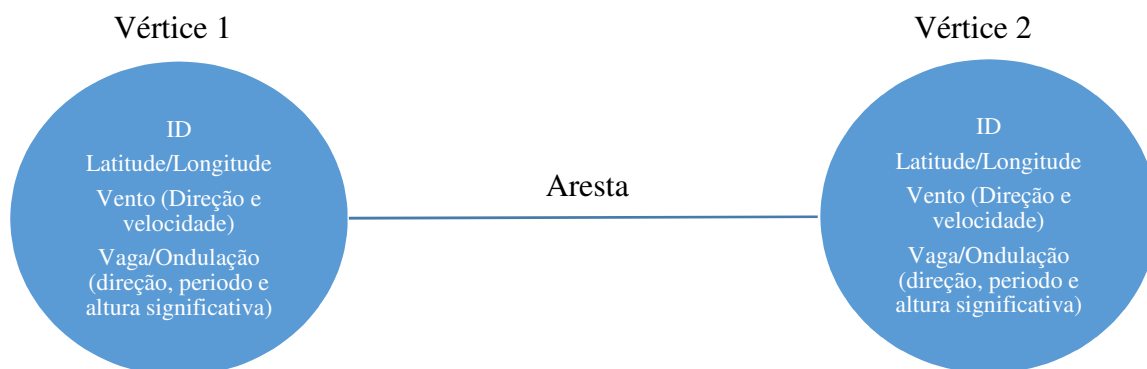


Figura 26- Exemplo de dois vértices e a informação neles contidos, esta encontra-se vertida na variável “data\_derrota”.

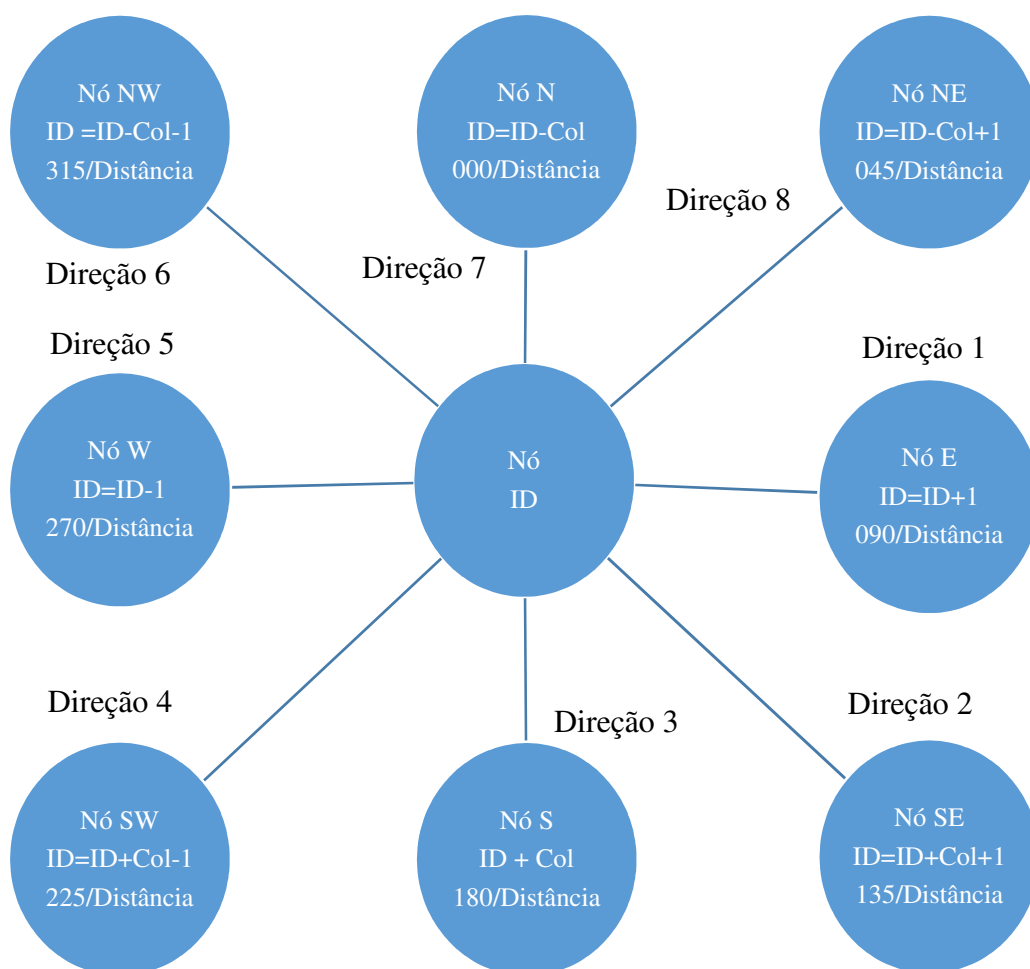


Figura 27-Ligação padrão entre um vértice e os vértices adjacentes

Como é possível visualizar Figura 27 cada vértice tem oito vértices adjacentes, estes têm um azimuth fixo, mas ao ser utilizada a função “distance” vai ser calculada uma distância



que tem um erro em azimuth bastante baixo. O erro criado tem de ser necessariamente retirado para o cálculo da derrota, como tal são arredondadas estes azimuths, corrigindo assim este erro.

De modo a evitar a navegação sobre terra, foram modificados os vértices que se localizam nestas massas, para conseguir este efeito ao serem carregados os dados de cada vértice é verificado o valor altura da ondulação, se este não for um número é automaticamente atribuído o valor  $\infty$  a todos os seus dados, na Figura 28 encontram-se dois nós sobre terra assinalados, como é possível verificar na variável “data\_derrota” os seus dados assumiram o valor  $\infty$ . Os arcos ao serem calculadas vão assumir o mesmo valor impedindo a sua seleção pelo algoritmo como um caminho.

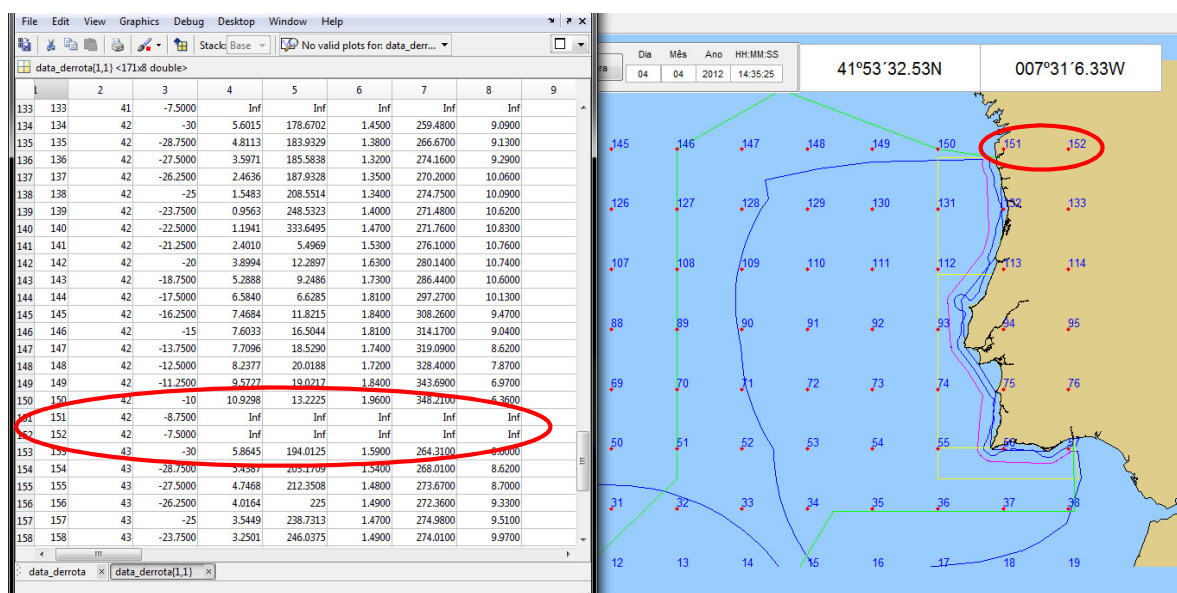
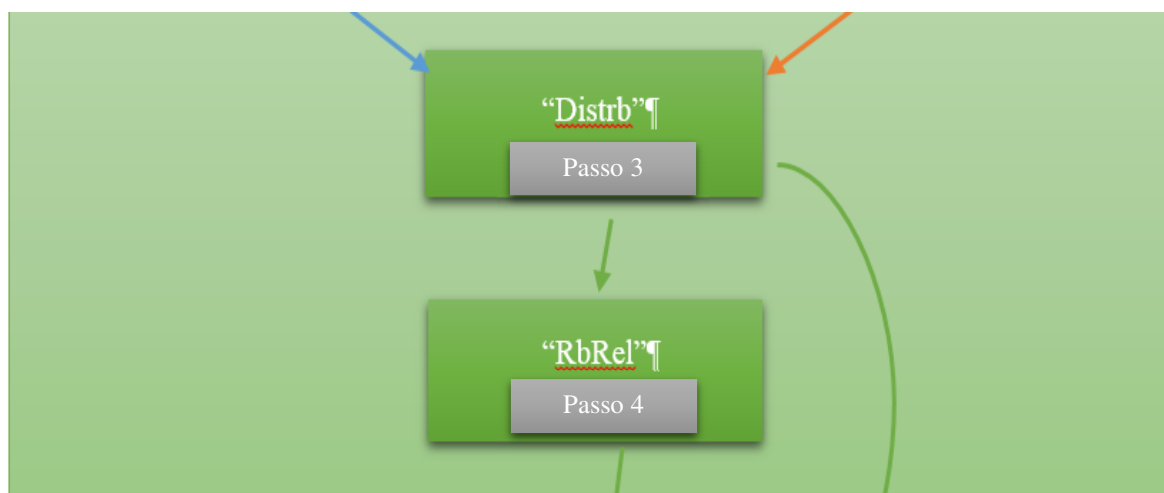


Figura 28- atribuição do valor  $\infty$  aos dados dos vértices localizados em terra

Na variável designada “Distrb” é calculado para cada vértice a distancia (Este corresponde ao passo 3 na Figura 29), através da função “distance” para todos os seus vértices adjacentes. Os vértices limite exterior ao serem criados têm a distancia dos arcos para fora da rede com o valor zero, como no cálculo com recurso ao algoritmo de Dijkstra isso não pode acontecer o valor destes arcos foi alterado para  $\infty$ , impossibilitando assim a escolha desses arcos.



*Figura 29 - Esquema resumo do cálculo das distâncias de todos os vértices e marcações*

No decorrer do presente capítulo foi possível verificar após uma pequena introdução quais os tipos de navegação praticados, visto que os sistemas de roteamento se focam principalmente na navegação oceânica. De seguida foram explorados os tipos de derrota estudados, verificadas as suas vantagens e desvantagens e ainda a sua aplicação pela Marinha Portuguesa. Foi demonstrado como foi criado o grafo utilizado na aplicação e qual a informação existente em cada vértice. Por último exposta a metodologia para a determinação das derrotas ortodrómicas e loxodrómicas utilizadas na aplicação de modo a possibilitar a sua comparação com a derrota roteada.

De seguida na variável designada “RbRel” vão ser calculadas todas as marcações do vento e do mar total para cada uma dos oito arcos de cada vértice (este corresponde ao passo 4 na Figura 29). Através desta variável será possível recorrer às matrizes “Vento” e “Ondas” para a obtenção das perdas de velocidade.

## 6. CALCULADOR DE DERROTA

Este capítulo demonstra passo a passo a teoria utilizada para o cálculo da derrota. É explicada a integração das matrizes “Vento” e “Ondas”, obtidas no estudo da reação do navio, que em conjunto com a informação dos dados meteo-oceanográficos vão criar uma soma de vetores. Por fim é explicado o algoritmo utilizado no cálculo da derrota.

Na elaboração deste trabalho foi utilizado o *software* MATLAB, da *Mathworks*. A escolha deste *software* deve-se à sua ampla divulgação e utilização na Marinha Portuguesa em sistemas de monitorização utilizados a bordo, sendo possível a reutilização de código previamente utilizado. Com a utilização deste *software* é ainda possível aliar a possibilidade de execução de algoritmos complexos com a visualização dos dados e resultados obtidos, através da sua interface simples e versátil (Timothy & Kermit, 2005, p. v).

### 6.1. Aplicação dos dados

Nesta secção será explicada como foram integrados os dados na aplicação e a razão pela escolha da metodologia utilizada.



Figura 30 - Esquema resumo do cálculo da variável "Custos"





Com foi anteriormente referido encontra-se no Apêndice 7 um esquema que prepara a variável designada por “Custos”, este esquema traduz os processos mais importantes na aplicação. No capítulo 4 foi demonstrado como através do suplemento “Read\_grib” pode ser carregado um ficheiro GRIB (Passo 1 no Apêndice 7), obtido através do modelo GFS ou WW3, em formato STRUCT.

No passo seguinte foi convertido para uma variável, do tipo DOUBLE, designada “data\_derrota” (Passo 2 no Apêndice 7).

No capítulo 5 foi calculado para cada vértice a distancia para todos os oito vértices adjacentes (Passo 3 na Figura 30).

Por fim foram calculadas as marcações do vento e do mar total de modo a poderem ser obtidos os valores para a perda de velocidade (Passo 4 na Figura 30).

Para a utilização da aplicação foi necessário criar uma variável com todas as perdas de velocidade designada de “Perd\_vel”, esta variável vai utilizar os valores obtidos na variável “RbRel”, assim como a altura do mar total e a velocidade do vento, de modo a procurar nas matrizes “Vento” e “Ondas” a respetiva perda de velocidade (este processo corresponde ao passo 5 na Figura 30).. A esta variável é somada a velocidade adotada, variável designada como “VelAdop”, para o cálculo, dando origem á variável designada de “Resul\_vel” (este processo corresponde ao passo 6 na Figura 30). Como resultado é obtida a velocidade a que serão percorridas todos os arcos viáveis.

Associada á velocidade adotada encontra-se o consumo horário referente ao regime de máquina adotado, este consumo encontra-se atribuído á variável designada de “consumo”.

De modo a calcular o consumo de combustível no trânsito entre vértices é criada a variável designada por “Custos”. O cálculo deste consumo é efetuado através da resolução da seguinte fórmula (este processo corresponde ao passo 7 na Figura 30).

*Equação 8 - Cálculo do consumo de trânsito entre vértices.*

$$"Custos" = \frac{"Result\_vel"}{"Distrb"} * "consumo"$$

“Custos” – Consumo do trânsito entre vértices. [Lts]



“Result\_vel” – Resultante da soma da velocidade adotada com as perdas de velocidade. [Kts]

“Distrb” – distância entre cada nó e o seu adjacente. [M]

Este cálculo é efetuado para todos os registos, direções e arcos viáveis. Ao ser realizado antes da aplicação do algoritmo, vai contribuir para a redução do tempo de cálculo da derrota ótima. Uma desvantagem desta metodologia é o facto de os vértices não terem em conta a velocidade do vértice anterior, ou seja, a velocidade adotada é sempre igual para todos os vértices.

## 6.2. Algoritmo de cálculo

Nesta secção está exposta a razão da escolha do algoritmo utilizado e a explicação da sua construção.

O algoritmo escolhido para servir como base no cálculo da derrota otimizada foi o algoritmo de Dijkstra, este foi escolhido com o intuito de permitir a utilização da aplicação a bordo do navio, onde o poder computacional é reduzido e a capacidade de obtenção de dados meteo-oceanográficas é bastante limitada. Com o recurso a este algoritmo é esperado que uma derrota seja calculada rapidamente e com uma fiabilidade aceitável.

O algoritmo de Dijkstra, como foi anteriormente referido, trata-se de um algoritmo de otimização bastante utilizado na resolução de problemas onde se torna necessário o cálculo do melhor entre dois pontos. Torna-se importante relembrar que este é um algoritmo “guloso”, ou seja a solução pode não ser a solução ótima.

A escolha deste algoritmo tem o intuito de resolver a seguinte função objetivo.

*Equação 9 - Função objetivo a ser resolvida recorrendo ao algoritmo de Dijkstra*

$$\min \sum_{(i,j) \in A} \text{Custo}_{ij}$$



Tal como no método analítico utilizado para a resolução deste algoritmo foi necessária criar uma matriz cujos elementos são o valor  $\infty$ , assim será facilmente encontrada o arco com o menor custo. Esta matriz encontra-se na variável “Vis”.

Para melhor compreender como são processados os dados neste algoritmo foi elaborado um esquema que traduz todo o processo (Figura 31)



*Figura 31-Processo efetuado pelo algoritmo durante o cálculo da derrota*

A primeira fase presente na Figura 31 é responsável pela procura do valor mais baixo na em toda a variável “Vis” (Figura 32), assegurando assim que todos os caminhos são constantemente avaliados, assim é identificado o arco com o menor custo.



Vis <901x8 double>									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	27779	
2	28217	Inf	Inf	Inf	28321	28617	28286	28518	
3	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	27800	Inf	27710	
4	28160	Inf	Inf	Inf	28235	28529	28209	28457	
5	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	27716	Inf	27656	
6	28172	Inf	Inf	Inf	28187	28477	28185	28463	
7	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	27705	Inf	27735	
8	28305	Inf	Inf	Inf	28231	28527	28271	28615	
9	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	27791	Inf	27880	

Figura 32 - exemplo da utilização da variável "Vis"

Na segunda fase, é alterada a informação do novo vértice, sendo que já foi obtido a sua direção é facilmente encontrado a sua identificação. Seguidamente são modificadas as informações relativas aos custos dos arcos do novo vértice, para tal é necessário calcular o tempo gasto ao ser percorrido o arco e registar a quantidade de combustível gasto até chegar a esse vértice. Registados estes dois dados são posteriormente calculados os consumos necessários para o uso dos sete arcos, excluindo o arco que acabou de ser percorrido, que ligam os vértices adjacentes, impedindo que seja novamente calculado o caminho de volta para o vértice anterior e que já seja tido em conta o tempo necessário para chegar a esse vértice. Estes consumos após calculados são substituídos na variável "Vis"

O registo é feito unicamente para ser posteriormente traçado o caminho, para tal sempre que é selecionado um vértice é verificado na variável "Melhor\_caminho\_noh" se o consumo até esse vértice é menor, caso seja é adicionado esse caminho na variável "Reg\_caminho".

### 6.3. Resultados esperados

Encontram-se nesta secção os resultados que se esperam obter com a utilização da aplicação nos navios assim como a explicação dos testes que se prepõe fazer.

Relativamente ao percurso é esperado que durante a viagem o navio e a guarnição sofram menos os efeitos das condições meteo-oceanográficas, permitindo assim um maior grau de segurança com a utilização desta aplicação. É também esperado que a velocidade



simulada seja superior á velocidade real, visto não ser considerada a corrente e as perdas de velocidade voluntárias.

Com a leitura do presente capítulo é possível verificar a metodologia utilizada para a integração dos dados da modelação do perfil dinâmico do navio, dos dados meteo-oceanográficas obtidos através da SailDocs e a criação do grafo. Seguidamente foi explanado o algoritmo utilizado no cálculo da derrota roteada, sendo este dividido em três processos mais simples, a procura do custo mais baixo, a alteração das variáveis e o registo do caminho. No final foram expostos quais os resultados esperados com o cálculo obtido na validação da aplicação



## 7. VALIDAÇÃO DA APLICAÇÃO

Neste capítulo é descrito o processo de validação da aplicação desenvolvida. Foram então compostas por várias fases, a verificação da simulação das velocidades, a verificação da possibilidade de utilização do mesmo perfil hidrodinâmico para a classe “João Coutinho”, a comparação entre os diferentes tipos de derrotas e por fim é comparada a derrota obtida com a derrota que foi praticada, pelo NRP “Jacinto Cândido” no trânsito dos Açores para Lisboa. De forma a permitir estas validações são utilizados os registos diários presentes no diário de navegação dos respetivos navios,

Como foi previamente referido estes sistemas são usualmente utilizados em viagens longas<sup>58</sup>. Como tal foram escolhidas as viagens praticadas entre os principais portos de Portugal que cumprem este requisito. As derrotas praticadas ao longo da costa são as mais praticadas pelos navios da Armada, no entanto como tem uma curta distancia e pequenas variações em longitude, não podem ser consideradas para o teste da aplicação. As derrotas praticadas entre Lisboa e a Madeira já têm um comprimento e variação em longitude maior, no entanto não são suficientemente grandes para compensar o uso da aplicação, assim sendo serão unicamente analisadas as derrotas praticadas entre os Açores e Lisboa.

Uma vez que a modelação foi baseada no desenho de uma corveta da classe “Baptista de Andrade” e de modo a verificar a aplicabilidade nas corvetas da Classe “João Coutinho” serão também comparadas as derrotas por um navio desta classe. Para a classe “Baptista de Andrade” foram utilizados os registos do NRP “Baptista de Andrade”, e para a classe “João Coutinho” foram utilizados os registos do NRP “Jacinto Cândido”.

Os dados requeridos para a comparação das derrotas praticadas foram obtidos através da consulta do Diário de Navegação dos respetivos navios. A escolha desta fonte justifica-se pelo compromisso entre o rigor e a confiança da informação registada “destina-se a registar todos os elementos, factos e ocorrências respeitantes à navegação ou que, pela sua importância” (Estado-maior da Armada, 1998, p. 7.1). O OQP é responsável pelo preenchimento do diário de navegação e nele se encontram os registos meteorológicos

---

<sup>58</sup> Como viagens compridas compreende-se viagens em que fosse utilizada a derrota ortodrómica (>600 milhas)



relativos à navegação. Para o teste apenas foram necessários os registos meteorológicos observados e as posições do navio.

Para o efeito de validação da modelação do comportamento do navio, foi necessário forçar a aplicação a percorrer um caminho aproximado descrito nos registos do diário de Navegação foram apagados todos os vértices pelos quais o navio não passa, permitindo assim que apenas seja calculada a derrota percorrida adicionalmente para cada vértice, em vez dos dados GRIB, foi utilizado a informação das condições meteo-oceanográficas registadas pelo navio. Assim espera-se verificar se o perfil hidrodinâmico se aproxima da realidade. Em cada vértice foi utilizado a velocidade adotada referente ao regime de máquina registado no diário de navegação.

Os Inputs utilizados para a elaboração destes testes encontram-se presentes no ficheiro “Testes de validação.xlsx” que acompanha esta dissertação, permitindo assim ao utilizador a recriação dos testes.

Para permitir ao leitor a fácil perceção das diferentes derrotas, foram desenhadas a verde as derrotas praticadas pelo navio e a vermelho as derrotas simuladas recorrendo á aplicação.

A escolha dos registos utilizados prende-se com o modelo a analisar, pois apenas foram considerados os registos com posições aproximadas as posições dos vértices obtidos com os ficheiros GRIB.

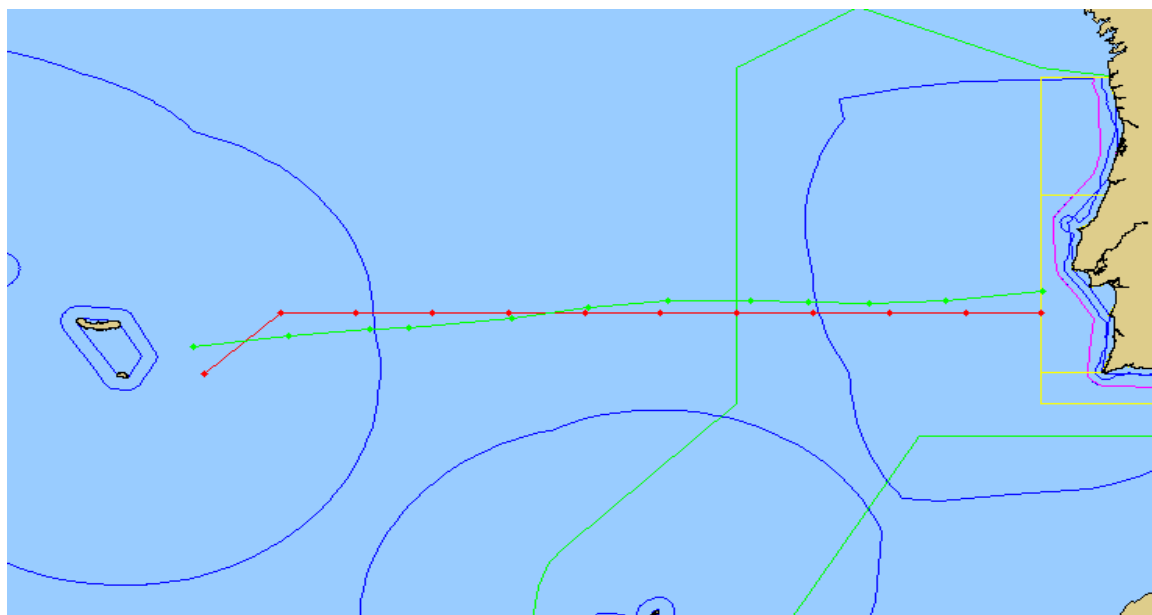
## 7.1. Validação do perfil hidrodinâmico

### Teste 1 – Viagem BNL – Ponta Delgada do NRP “Baptista de Andrade”

Neste teste pretende-se comparar os valores da velocidade simulada com a média dos registos de modo a validar o perfil hidrodinâmico desenvolvido. Para tal foram utilizados os *inputs* presentes nas abas referentes a este teste no ficheiro “Testes de validação.xlsx”.

Período da Viagem- 01 de outubro de 2012 a 03 de outubro de 2012

Foram obtidas as derrotas presentes na Figura 33 e o respetivo gráfico de velocidades na Figura 35 recorrendo ao modelo WW3. Recorrendo ao modelo GFS, foi obtida a representação gráfica apresentada na Figura 34 o respetivo gráfico de velocidade na Figura 36.



*Figura 33 - Viagem BNL – Ponta Delgada do NRP “Baptista de Andrade” recorrendo ao modelo WW3*



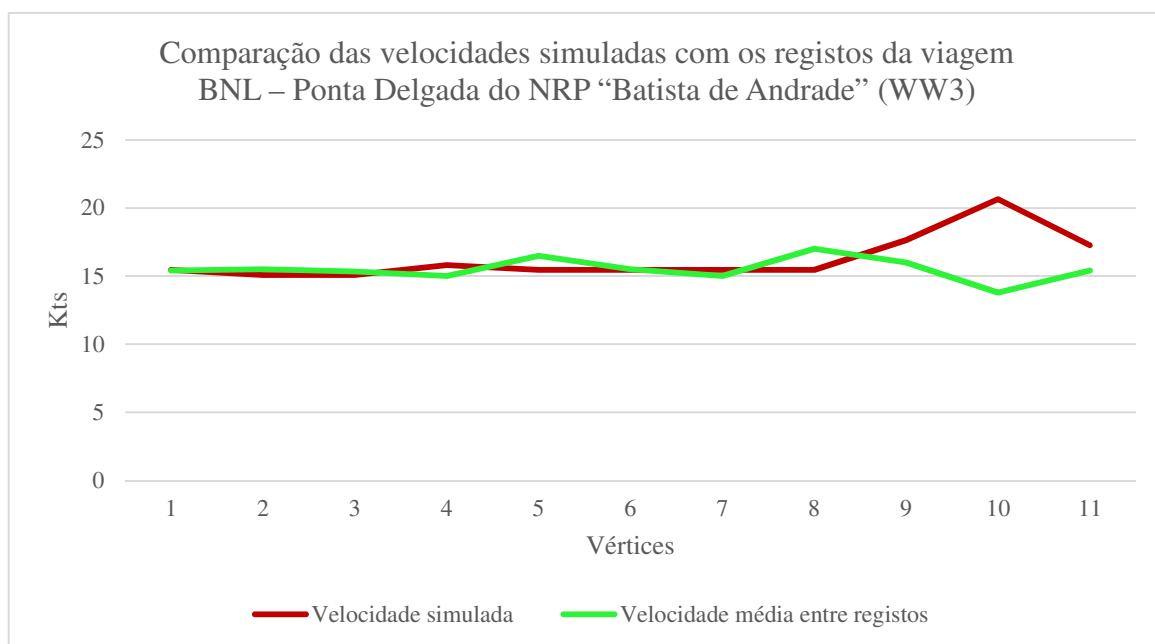


Figura 35 - Comparação das velocidades simuladas com os registos da viagem BNL – Ponta Delgada do NRP “Batista de Andrade” (WW3)

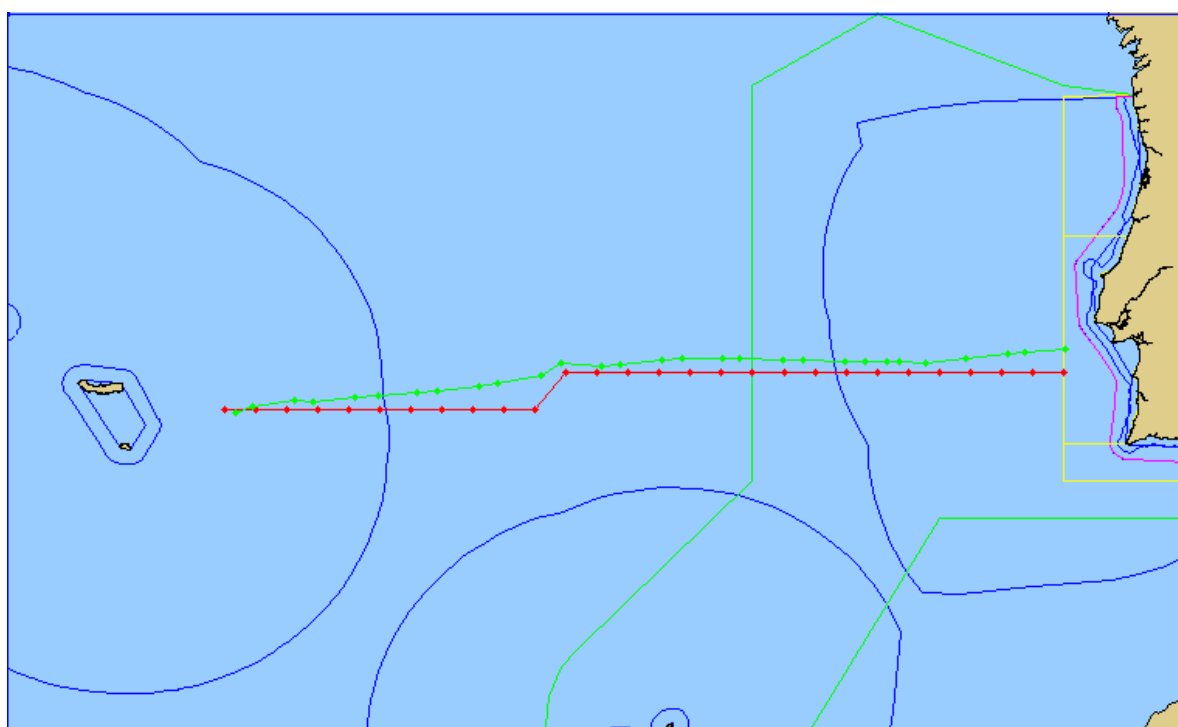


Figura 34 - Viagem BNL – Ponta Delgada do NRP “Baptista de Andrade” recorrendo ao modelo GFS

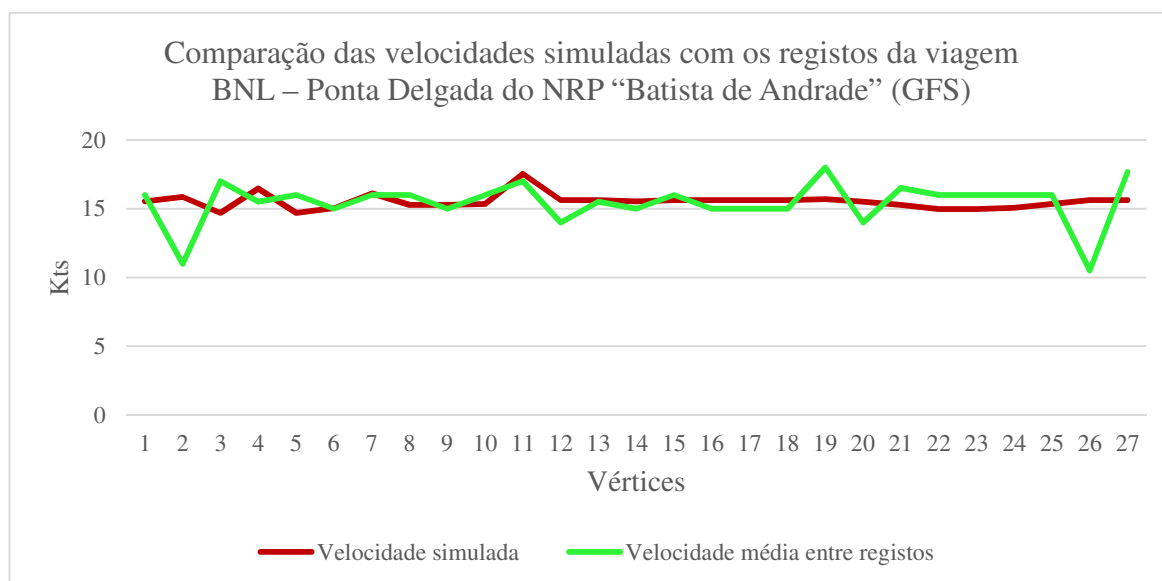


Figura 36- Comparação das velocidades simuladas com os registos da viagem BNL – Ponta Delgada do NRP “Baptista de Andrade” (GFS)

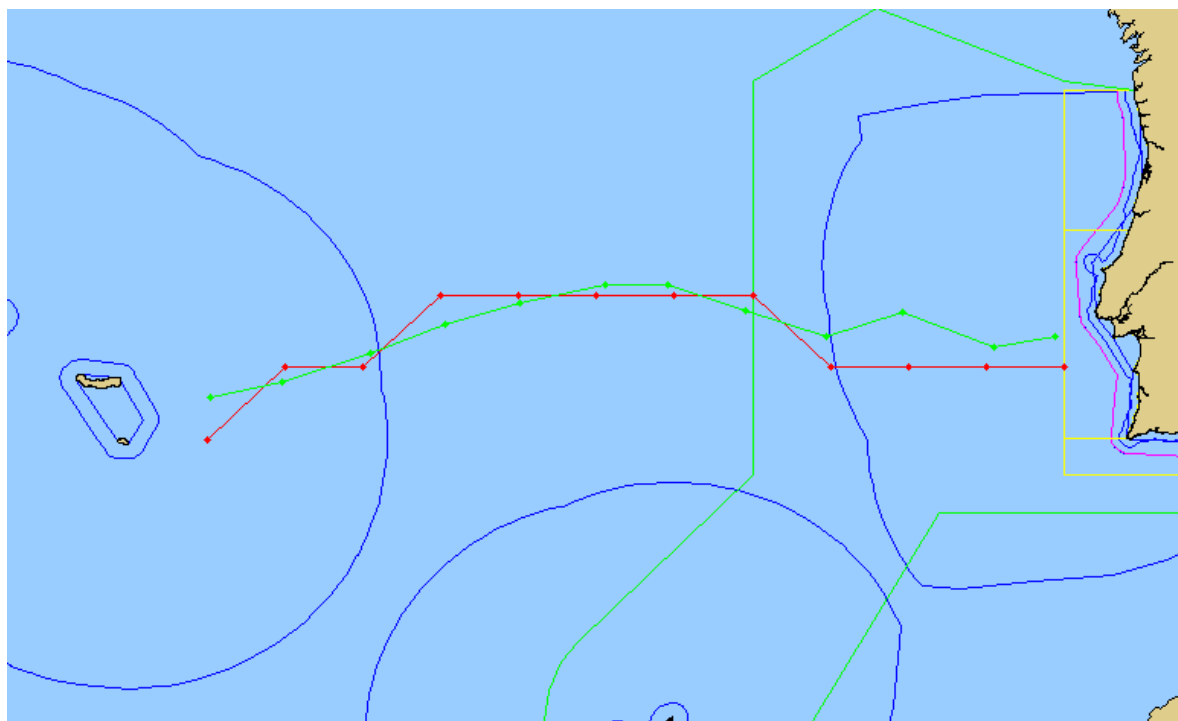
Através da análise dos gráficos das **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** e Figura 36 é possível verificar que existe uma diferença considerável entre a velocidade simulada e a velocidade dos registos. A média dos desvios é aproximadamente 1,36 nós na primeira análise e 0,51 nós na segunda análise. A diferença registada deve-se essencialmente às perdas de velocidade que não foram consideradas, tais como efeitos da corrente e a perda de velocidade voluntária.

Teste 2 – Viagem Ponta Delgada – BNL do NRP “Baptista de Andrade”

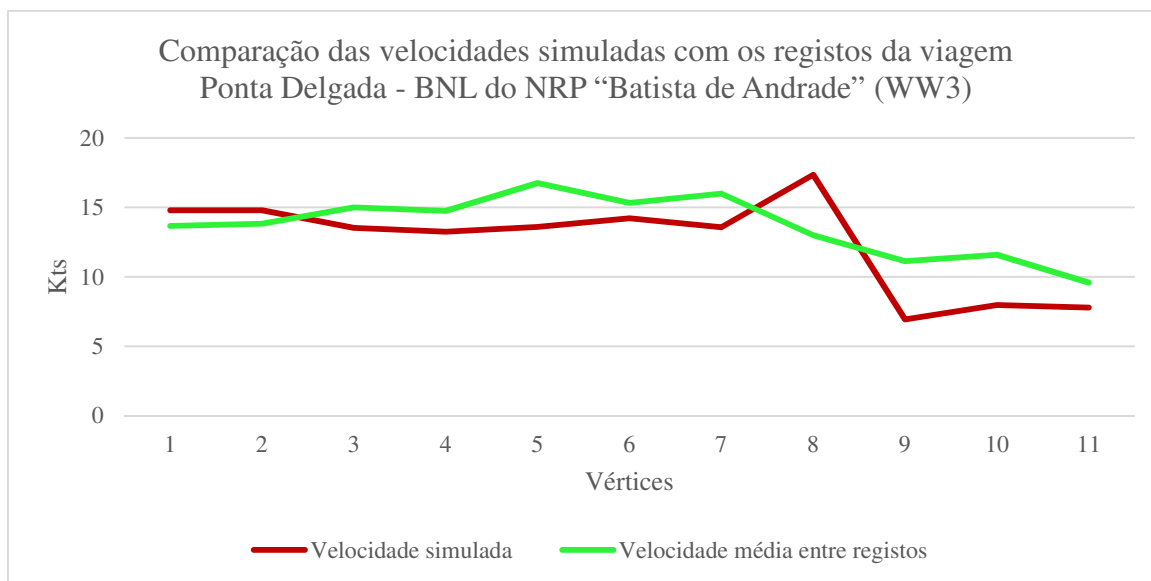
Neste teste pretende-se comparar os valores da velocidade simulada com a média dos registos de modo a validar o perfil hidrodinâmico desenvolvido. Para tal foram utilizados os *inputs* presentes nas abas referentes a este teste no ficheiro “Testes de validação.xlsx”.

Período da Viagem- 28 de dezembro de 2012 a 30 de dezembro de 2012

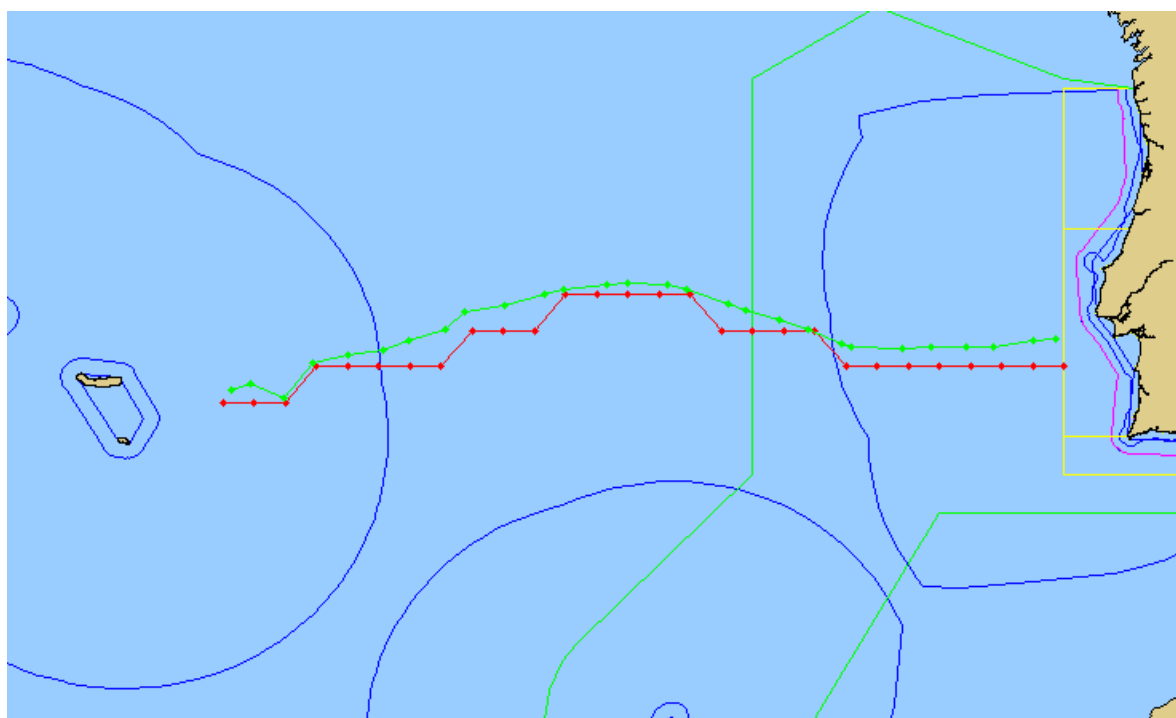
Foram obtidas as derrotas presentes na Figura 37 e o respetivo gráfico de velocidades na Figura 39 recorrendo ao modelo WW3. Recorrendo ao modelo GFS, foi obtida a representação gráfica apresentada na Figura 38 Figura 39 o respetivo gráfico de velocidade na Figura 40.



*Figura 37 - Viagem Ponta Delgada – BNL do NRP “Baptista de Andrade” recorrendo ao modelo WW3*



*Figura 38- Comparação das velocidades simuladas com os registos da viagem Ponta Delgada - BNL do NRP “Baptista de Andrade” (WW3)*



*Figura 39 - Viagem Ponta Delgada – BNL do NRP “Baptista de Andrade” recorrendo ao modelo GFS*

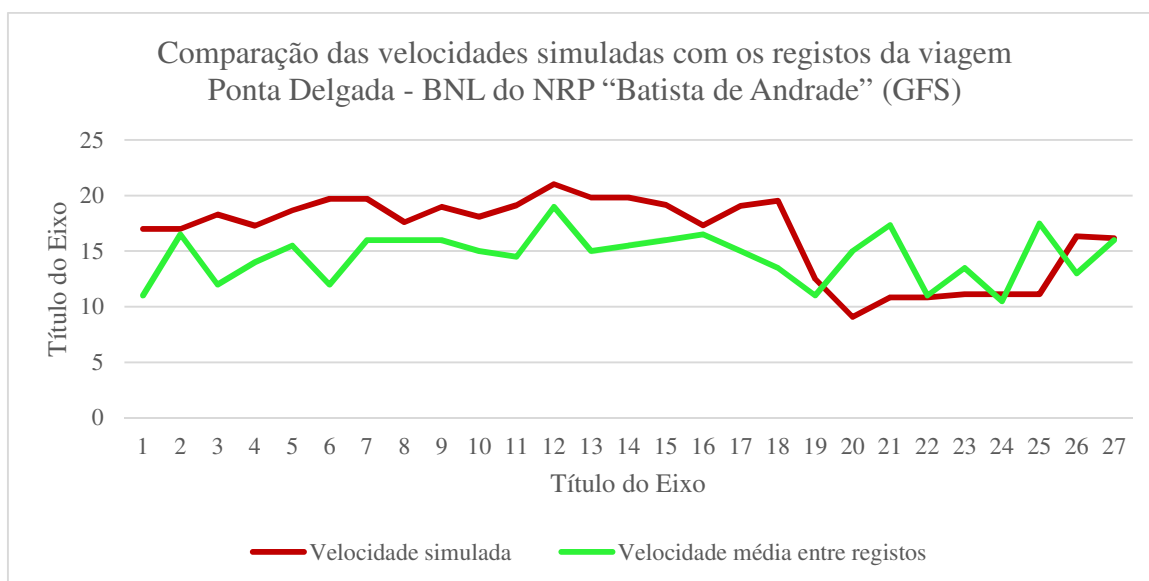


Figura 40- Comparação das velocidades simuladas com os registos da viagem Ponta Delgada - BNL do NRP “Baptista de Andrade” (GFS)

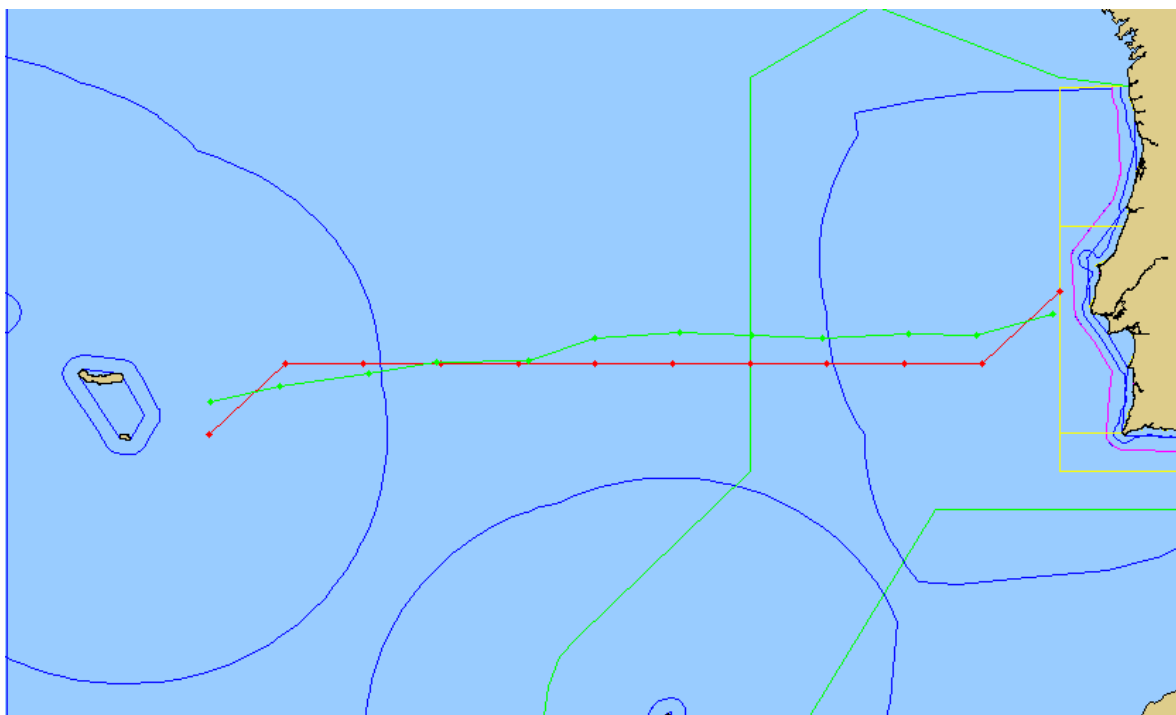
Na Figura 38 e Figura 40 é possível verificar uma grande discrepância entre as velocidades simuladas e as velocidades obtidas através dos registos do diário. Nas viagens simuladas foram praticadas velocidades com uma diferença média de 2,34 nós (modelo WW3) e 4 nós (modelo GFS) das velocidades registadas. É ainda possível verificar que a velocidade simulada entre as análises varia pouco, no entanto as médias dos registos têm uma elevada flutuação. Este facto deve-se ao afastamento temporal entre os registos.

### Teste 3 – Viagem BNL – Ponta Delgada do NRP “Jacinto Cândido”

Neste teste pretende-se comparar os valores da velocidade simulada com a média dos registos de modo a validar o perfil hidrodinâmico desenvolvido para a classe “João Coutinho”. Para tal foram utilizados os *inputs* presentes nas abas referentes a este teste no ficheiro “Testes de validação.xlsx”.

Período da Viagem- 30 de abril de 2013 a 03 de maio de 2013

Foram obtidas as derrotas presentes na Figura 41 e o respetivo gráfico de velocidades na Figura 42 recorrendo ao modelo WW3. Recorrendo ao modelo GFS, foi obtida a representação gráfica apresentada na Figura 43. Figura 38 o respetivo gráfico de velocidade na Figura 44.



*Figura 41- Viagem BNL – Ponta Delgada do NRP “Jacinto Cândido” recorrendo ao modelo WW3*

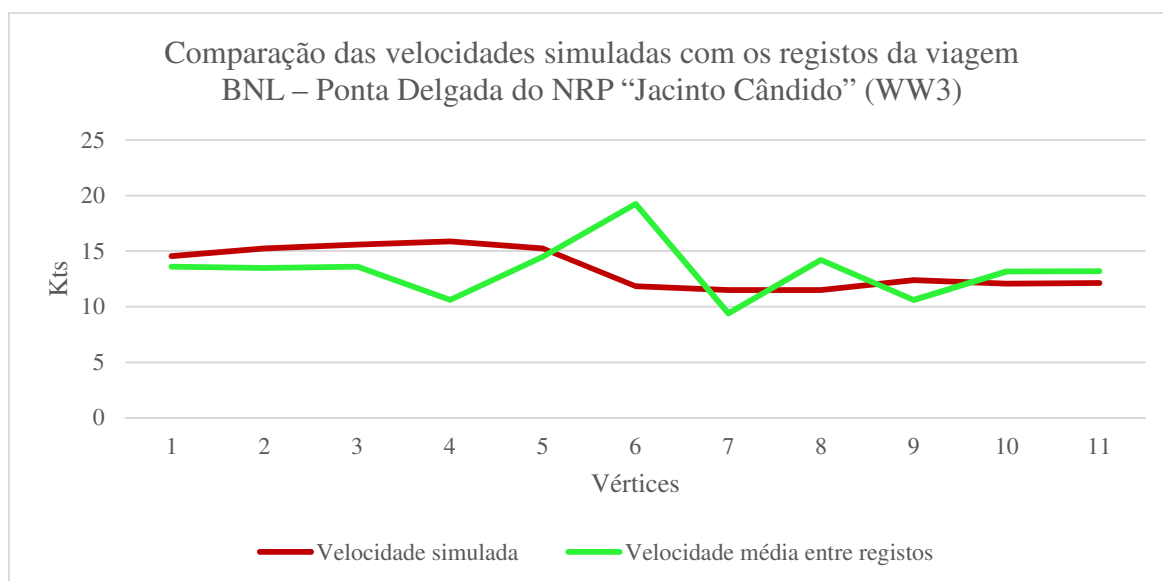


Figura 42- Comparação das velocidades simuladas com os registos da viagem BNL – Ponta Delgada do NRP “Jacinto Cândido” (WW3)

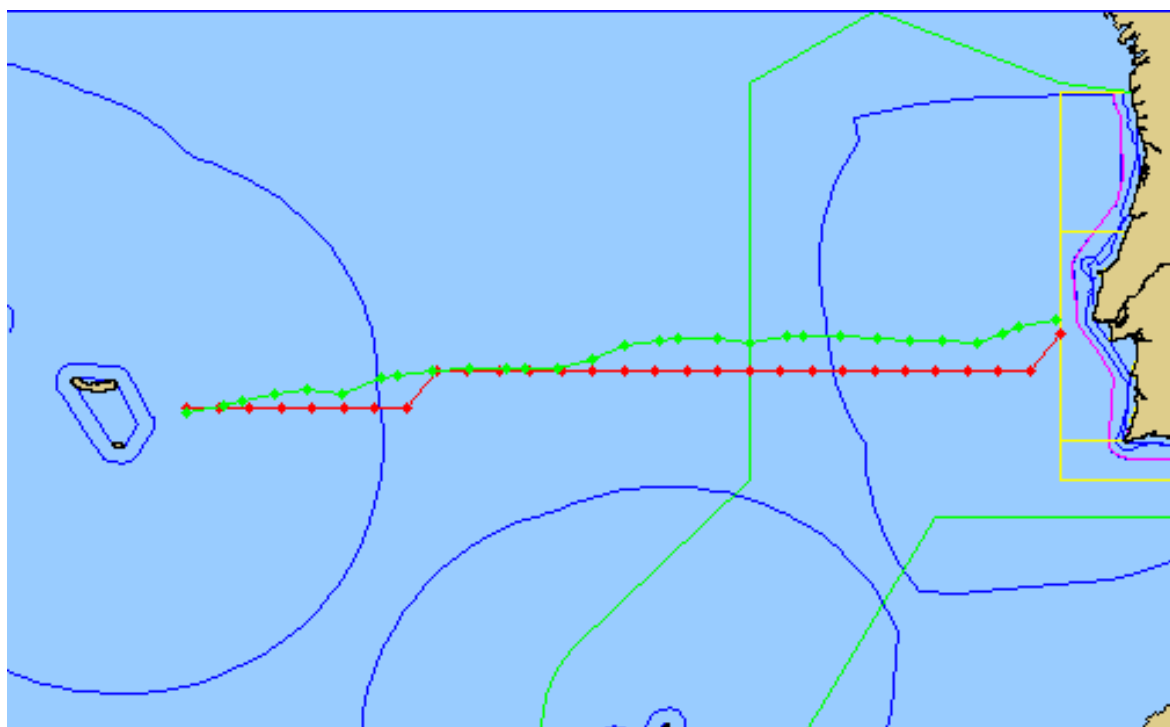


Figura 43 – Ponta Delgada do NRP “Jacinto Cândido” recorrendo ao modelo GFS

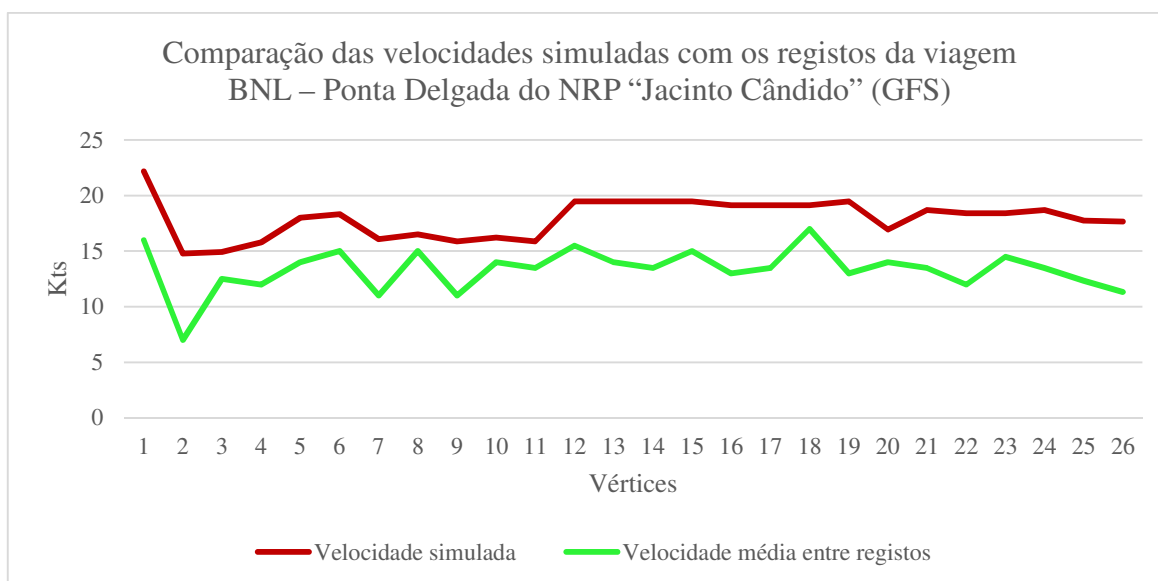


Figura 44- Comparação das velocidades simuladas com os registos da viagem BNL – Ponta Delgada do NRP “Jacinto Cândido” (GFS)

Através da comparação entre a velocidade simulada e a velocidade obtida através dos registos, expostos nas Figura 42 e Figura 44, é possível verificar que a velocidade simulada é ligeiramente superior ao que foi praticado. No primeiro gráfico é verificado uma média de desvios de 2,44 nós acima da velocidade verdadeira, enquanto que no modelo GFS é obtido um desvio de 4,5 nós. É possível então afirmar que a razão para o desvio no cálculo do consumo encontra-se na discrepância existente no cálculo das velocidades.



#### Teste 4 – Viagem Ponta Delgada – BNL do NRP “Jacinto Cândido”

Neste teste pretende-se comparar os valores da velocidade simulada com a média dos registos de modo a validar o perfil hidrodinâmico desenvolvido para a classe “João Coutinho”. Para tal foram utilizados os *inputs* presentes nas abas referentes a este teste no ficheiro “Testes de validação.xlsx”.

Período da Viagem- 11 de julho de 2013 a 14 de julho de 2013

Foram obtidas as derrotas presentes na Figura 41 e o respetivo gráfico de velocidades na Figura 42 recorrendo ao modelo WW3. Recorrendo ao modelo GFS, foi obtida a representação gráfica apresentada na Figura 43. Figura 38 o respetivo gráfico de velocidade na Figura 44.

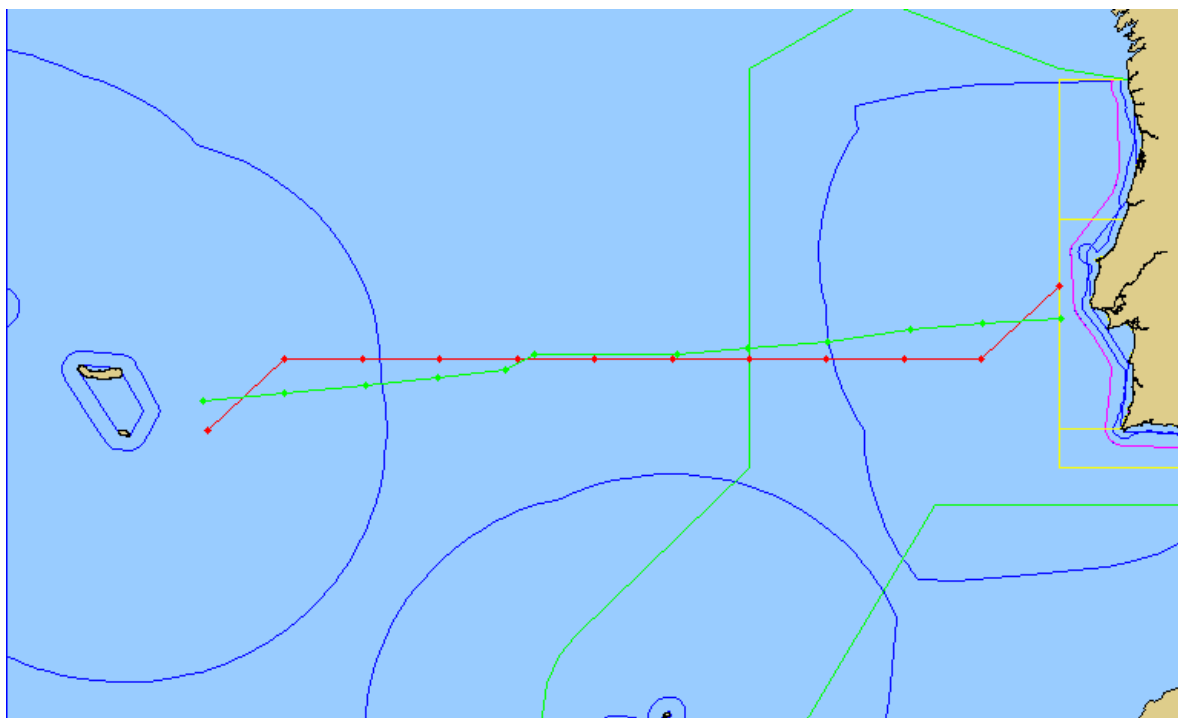


Figura 45- Viagem Ponta Delgada – BNL do NRP “Jacinto Cândido” recorrendo ao modelo WW3

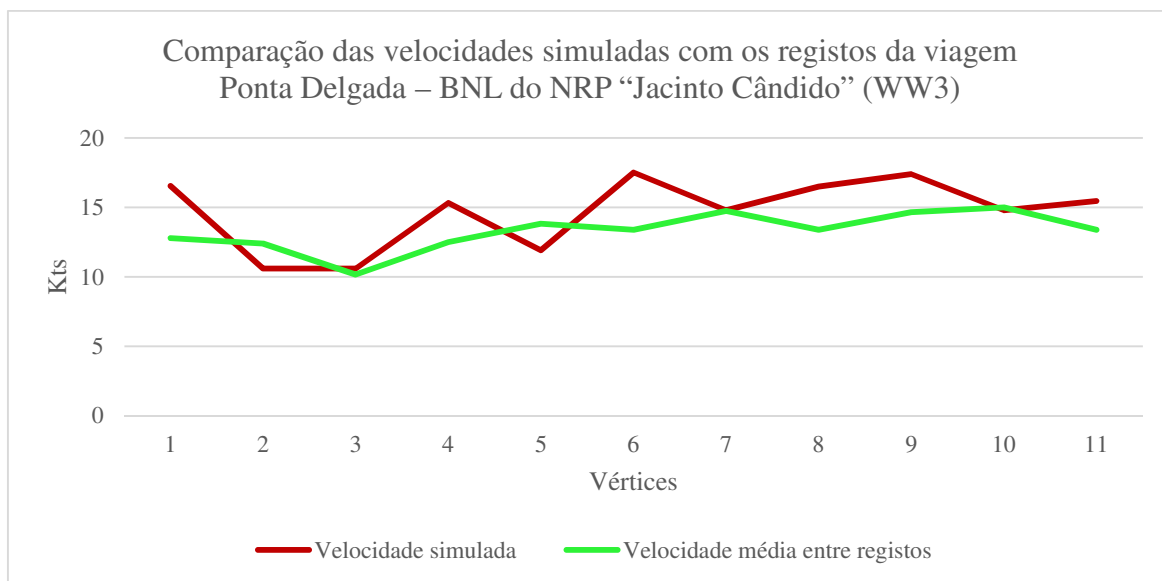


Figura 46- Comparação das velocidades simuladas com os registos da viagem Ponta Delgada – BNL do NRP “Jacinto Cândido” (WW3)

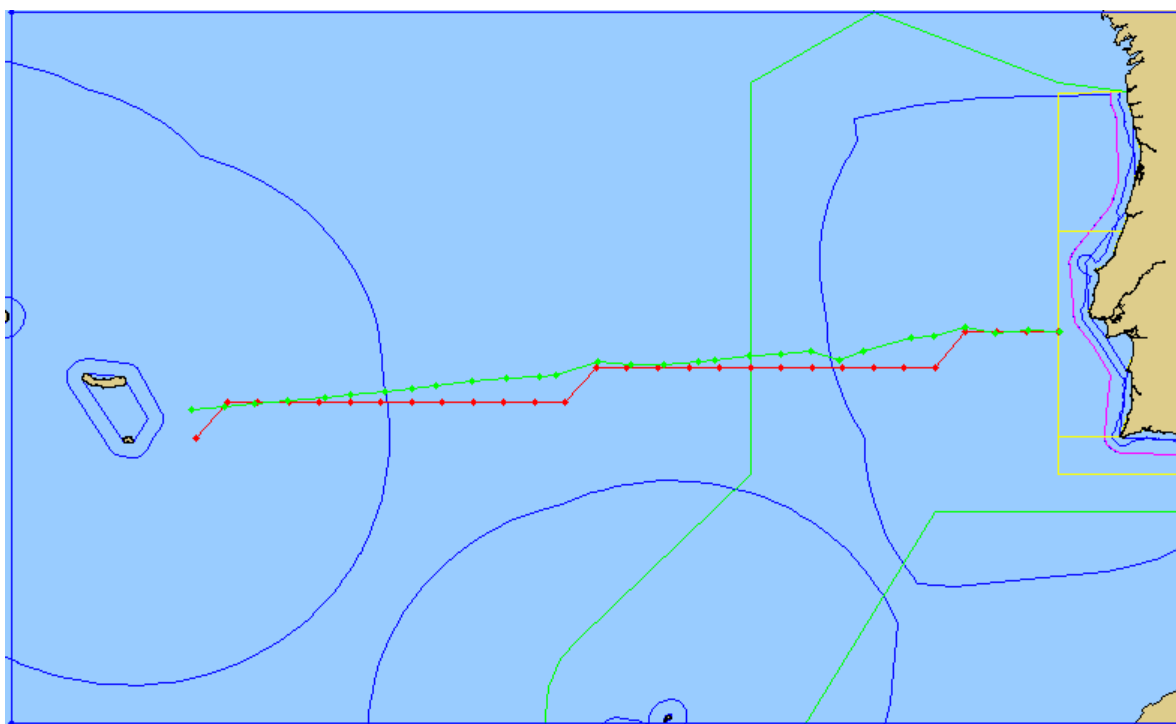


Figura 47- Viagem Ponta Delgada – BNL do NRP “Jacinto Cândido” recorrendo ao modelo GFS

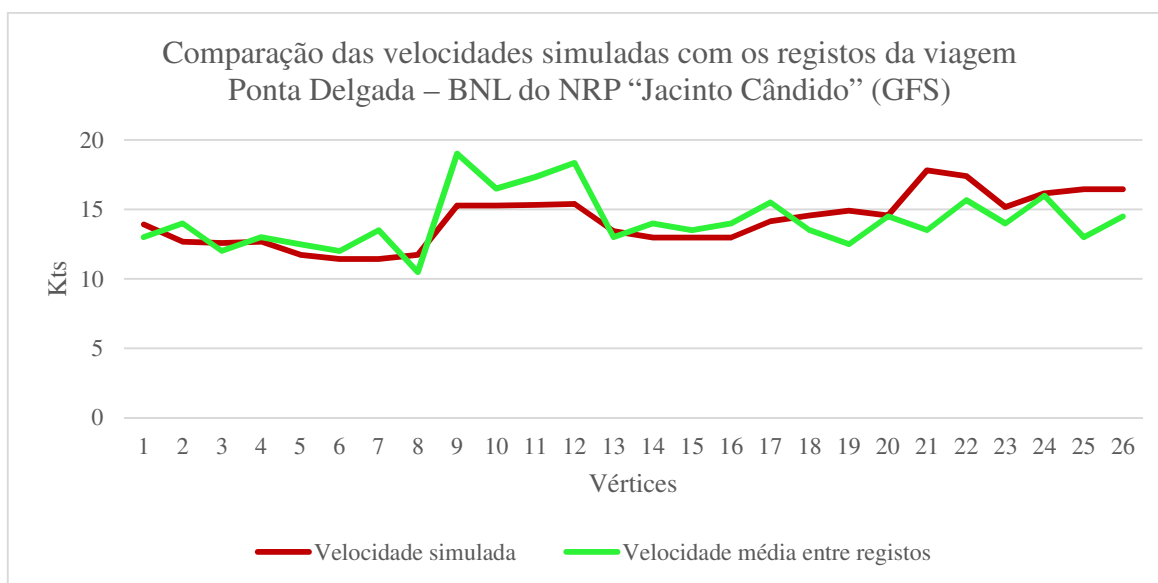


Figura 48- Comparação das velocidades simuladas com os registos da viagem Ponta Delgada – BNL do NRP “Jacinto Cândido” (GFS)

Na análise dos resultados expostos nas Figura 46 e Figura 48 são verificadas respetivamente velocidades simuladas com um desvio médio de 2 nós e 0,63 nós acima da velocidade registada.

## 7.2. Simulação das viagens

### Teste 5 – Simulação de uma viagem BNL – Ponta Delgada do NRP “Baptista de Andrade”

Neste teste pretende-se comparar os das derrotas simuladas com as ortodromias e loxodromias adotadas de modo a validar o algoritmo desenvolvido. Para tal foram utilizados os *inputs* presentes nas abas referentes a este teste no ficheiro “Testes de validação.xlsx”.

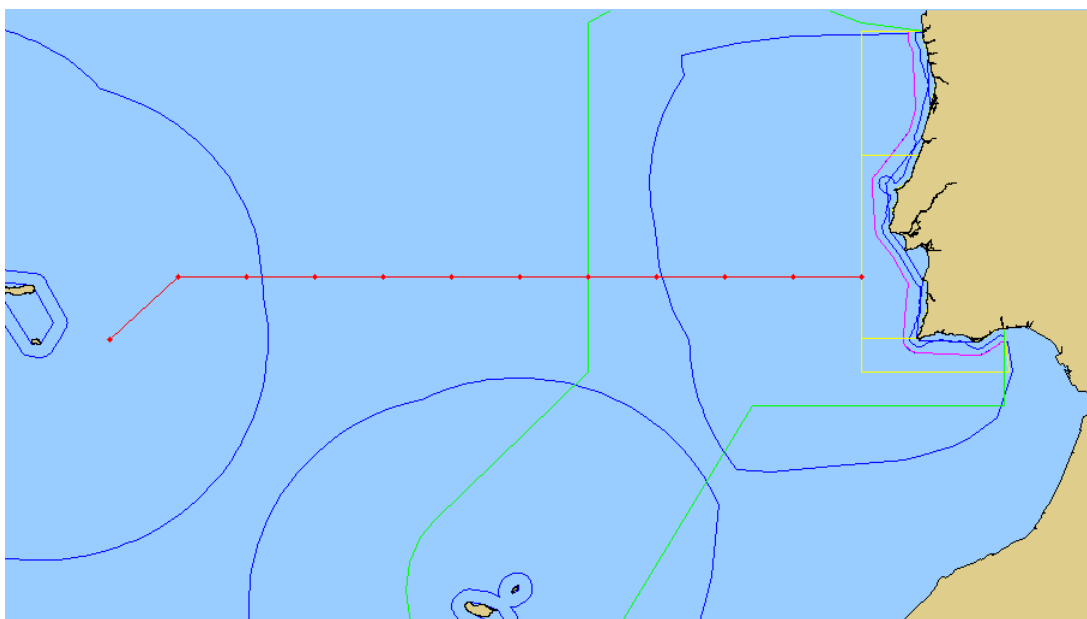


Figura 49 - Simulação de uma viagem BNL – Ponta Delgada do NRP “Baptista de Andrade” sendo recorrido ao modelo WW3, Derrotas Ortodrómica e roteada sobrepostas.

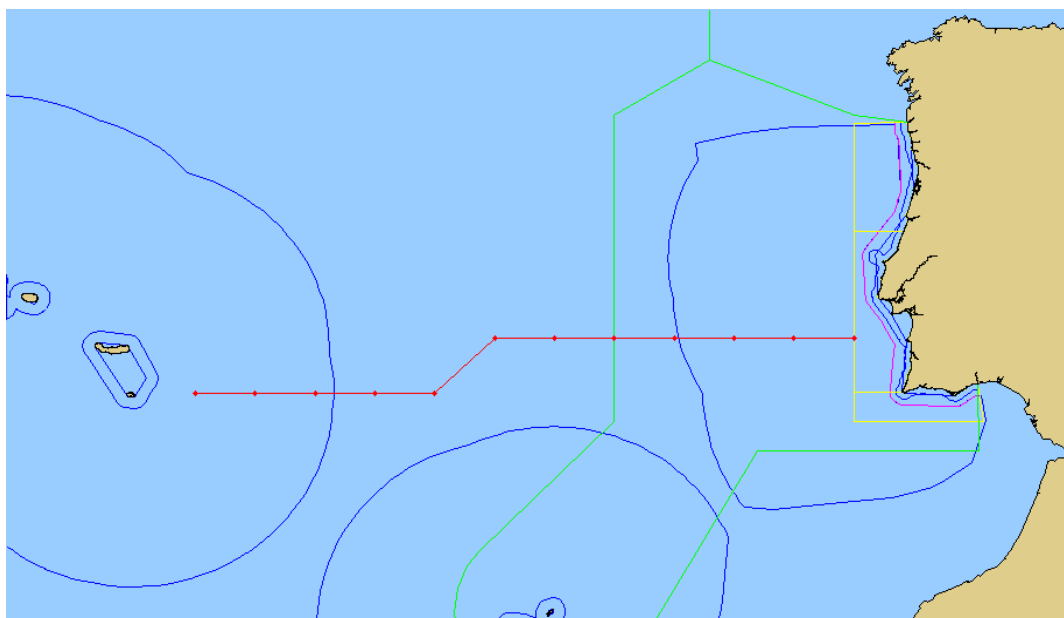


Figura 50- Simulação de uma viagem BNL – Ponta Delgada do NRP “Baptista de Andrade” sendo recorrido ao modelo WW3, derrota loxodromia



## Otimização das derrotas dos navios do tipo corveta

Tabela 8 -Tabela resumo das derrotas utilizadas na simulação de uma viagem BNL – Ponta Delgada do NRP “Baptista de Andrade” sendo recorrido ao modelo WW3

Modelo: ww3

Tipo de derrota	Distancia percorrida (M)	Número de vértices visitados	Combustível gasto (Lts)	Piores condições meteorológicas			
				Vento (Kts/Direção)		Ondulação (Direção/Altura)	
Derrota loxodrómica	777,09	12	30838	10,03	26,25	16,59439	2,116
Derrota Ortodrómica	656.65	12	28594	2,12	353,02	16,59439	2,119
Derrota Roteada	656.65	12	28594	2,12	353,02	16,59439	2,119

Como é possível verificar na Figura 49 e na Figura 50a diferença, existente na escolha da derrotas é quase nula pelo que o modelo vai assumir o mesmo caminho para a derrota roteada e a ortodrómia, sendo a distancia percorrida e o consumo iguais segundo aTabela 8. É possível ainda verificar que as derrotas roteada e ortodrómia obtêm valores mais baixos em todos os campos com a excepção do numero de vértices visitados.

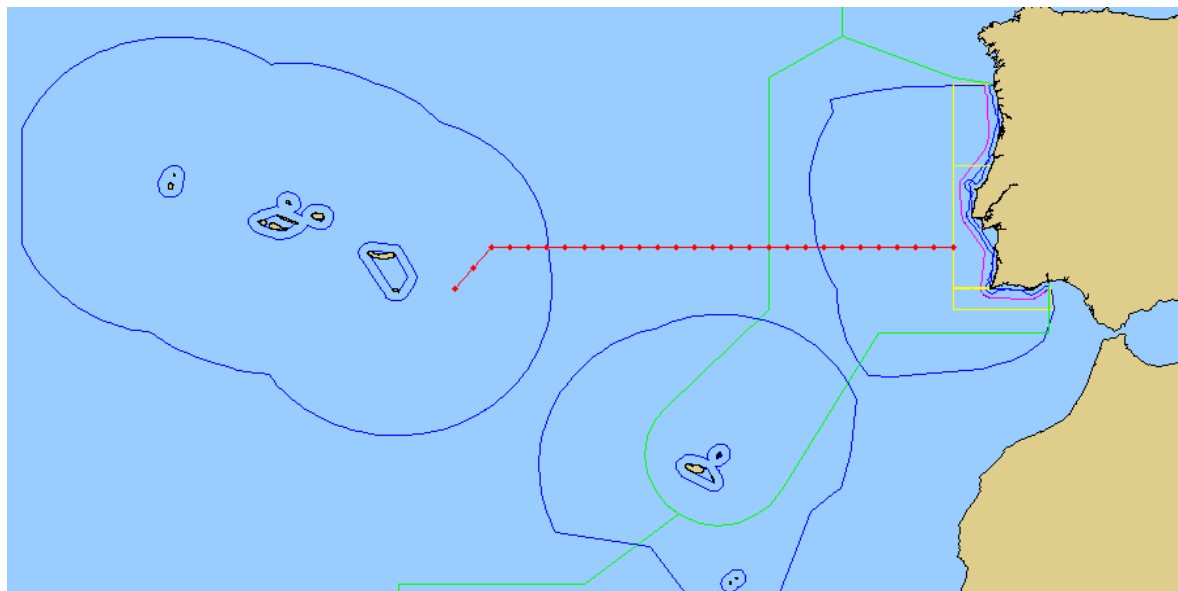
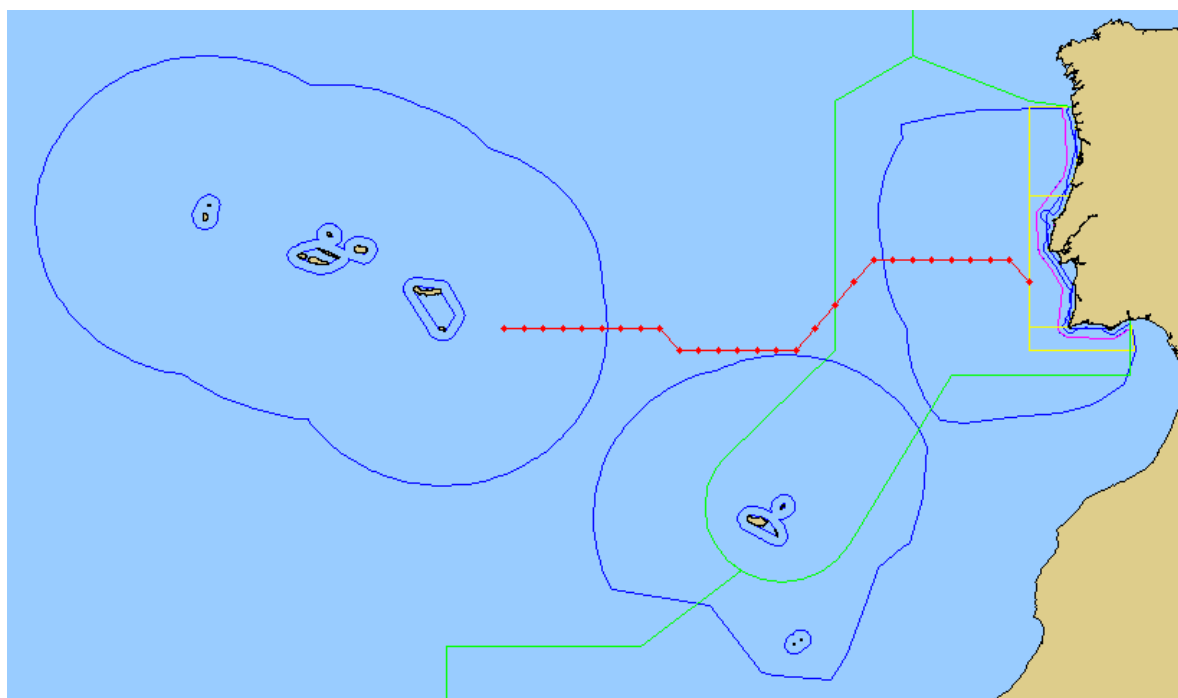
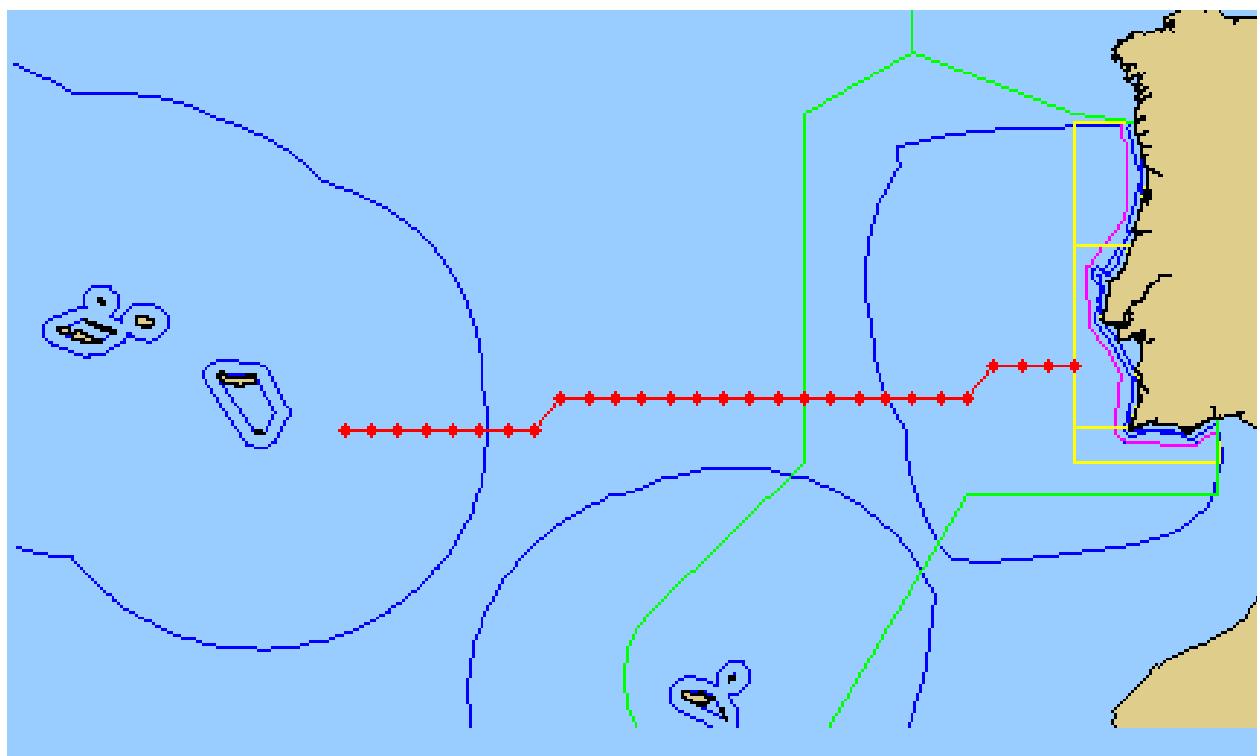


Figura 51 - Simulação de uma viagem BNL – Ponta Delgada do NRP “Baptista de Andrade” sendo recorrido ao modelo GFS, derrota ortodromia



*Figura 52 - Figura 11 - Simulação de uma viagem BNL – Ponta Delgada do NRP “Baptista de Andrade” sendo recorrido ao modelo GFS, derrota roteada*



*Figura 53- Figura 11 - Simulação de uma viagem BNL – Ponta Delgada do NRP “Baptista de Andrade” sendo recorrido ao modelo GFS, derrota loxodromia*



## Otimização das derrotas dos navios do tipo corveta

Tabela 9 - Tabela resumo das derrotas utilizadas na simulação de uma viagem BNL – Ponta Delgada do NRP “Baptista de Andrade” sendo recorrido ao modelo GFS

Modelo: GFS

Tipo de derrota	Distancia percorrida	Número de vértices visitados	Combustível gasto	Piores condições meteorológicas	
				Vento ( Kts/Direção)	
Derrota loxodrómica	644.83	28	30415	2,12	353,02
Derrota Ortodrómica	644.83	28	28341	2,12	353,02
Derrota Roteada	644.83	28	28691	2,12	353,02

Com o recurso ao modelo GFS é possível verificar que o tempo de cálculo das derrotas é aumentado, assim como o seu rigor. Neste caso a distancia será a mesma embora os consumos sejam diferentes. Foi ainda verificado que no cálculo da derrota roteada foi obtido um resultado que não é ótimo, derivado do facto do algoritmo de Dijkstra ser um algoritmo guloso.

Teste 6 – Simulação de uma viagem Ponta Delgada – BNL do NRP “Baptista de Andrade”

Neste teste pretende-se comparar os das derrotas simuladas com as ortodromias e loxodromias adotadas de modo a validar o algoritmo desenvolvido. Para tal foram utilizados os *inputs* presentes nas abas referentes a este teste no ficheiro “Testes de validação.xlsx”.

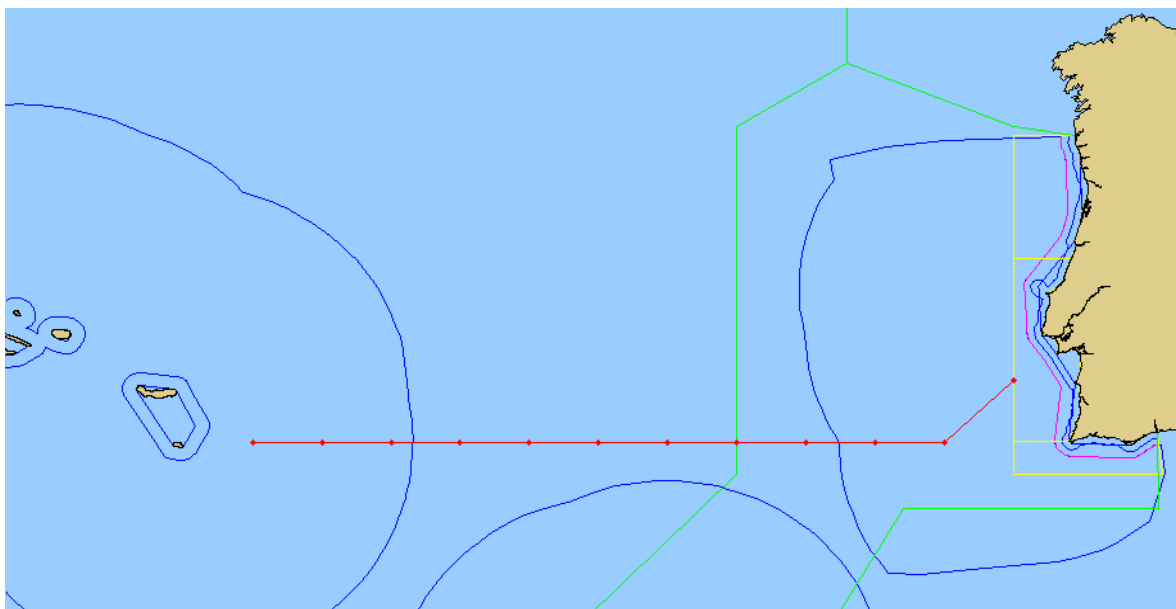


Figura 54 - Simulação de uma viagem Ponta Delgada – BNL do NRP “Baptista de Andrade” sendo recorrido ao modelo WW3, derrota loxodromia

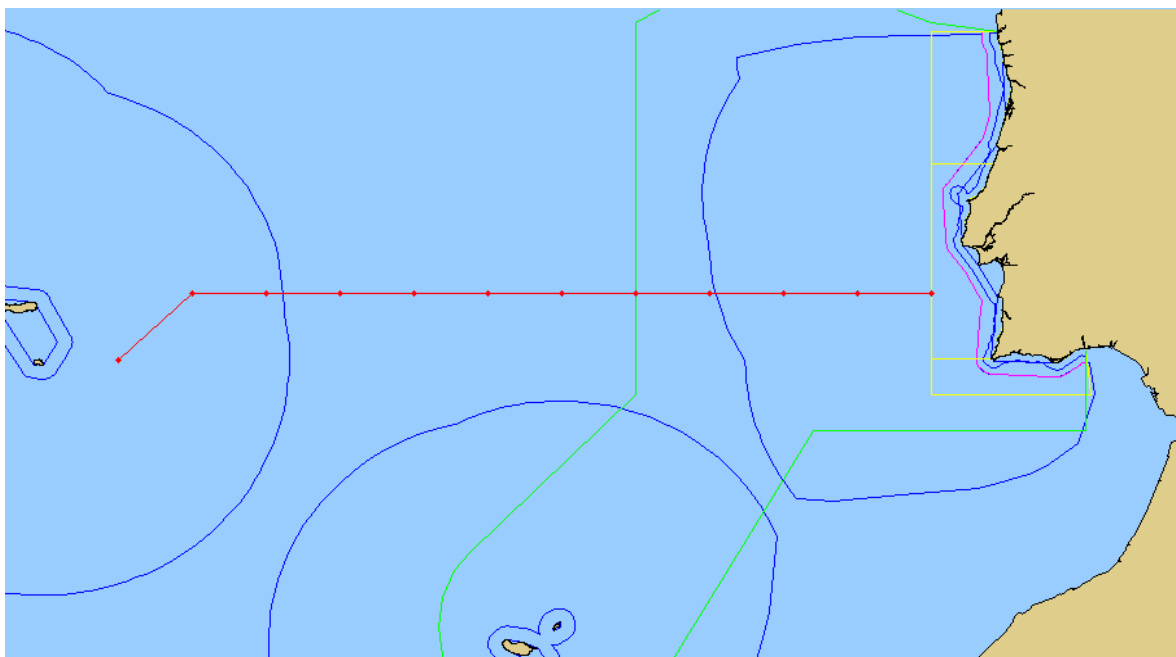


Figura 55-Simulação de uma viagem Ponta Delgada – BNL do NRP “Baptista de Andrade” sendo recorrido ao modelo WW3, derrotas ortodromia e roteada





## Otimização das derrotas dos navios do tipo corveta

Tabela 10- - Tabela resumo das derrotas utilizadas na simulação de uma viagem BNL – Ponta Delgada do NRP “Baptista de Andrade” sendo recorrido ao modelo WW3

Modelo: ww3

Tipo de derrota	Distancia percorrida	Número de vértices visitados	Combustível gasto	Piores condições meteorológicas			
				Vento / ondulação			
Derrota loxodrómica	777,10	12	32113	2,12	353,02	16,59439	2,12
Derrota Ortodrómica	656.65	12	28770	2,12	353,02	16,59439	2,12
Derrota Roteada	656.65	12	28770	2,12	353,02	16,59439	2,12

À semelhança do caso anterior as derrota ortodromia e roteada vão ser coincidentes, este facto deve-se ao afastamento dos pontos fornecidos pelo ficheiro GRIB, que devido á sua resolução mais baixa permite diferenciar estes dois tipos de derrota com esta distância.

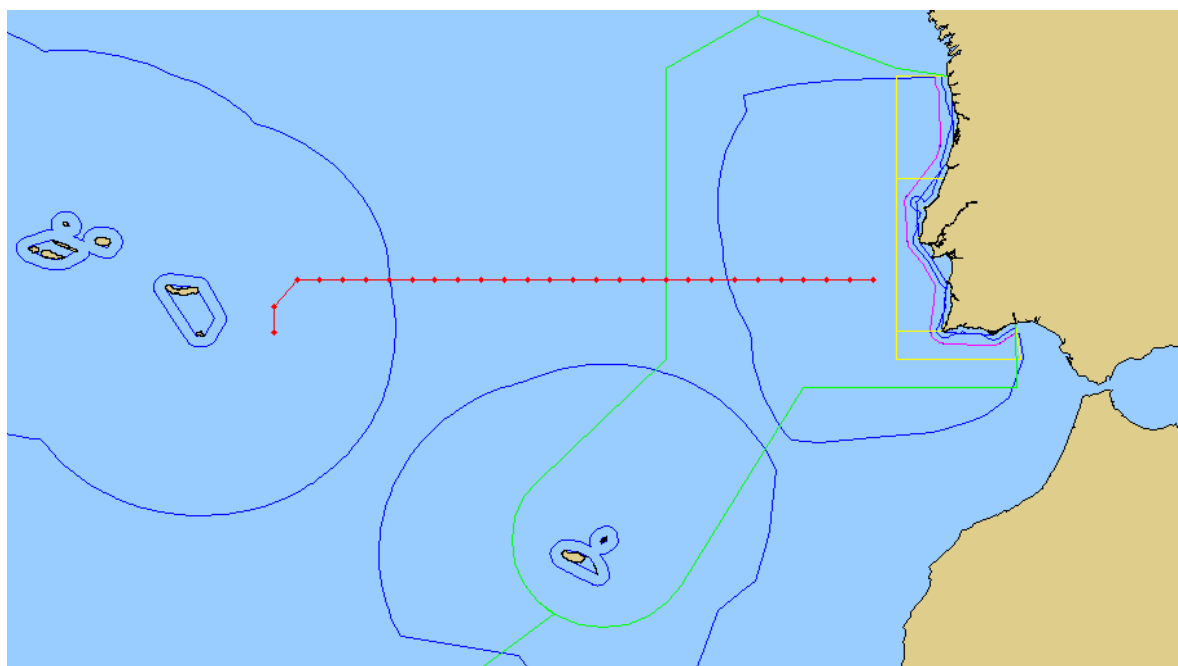


Figura 56 - Simulação de uma viagem Ponta Delgada – BNL do NRP “Baptista de Andrade” sendo recorrido ao modelo GFS, derrota roteada sobrepostas



## Otimização das derrotas dos navios do tipo corveta

Tabela 11 - Tabela resumo das derrotas utilizadas na simulação de uma viagem BNL – Ponta Delgada do NRP “Baptista de Andrade” sendo recorrido ao modelo GFS

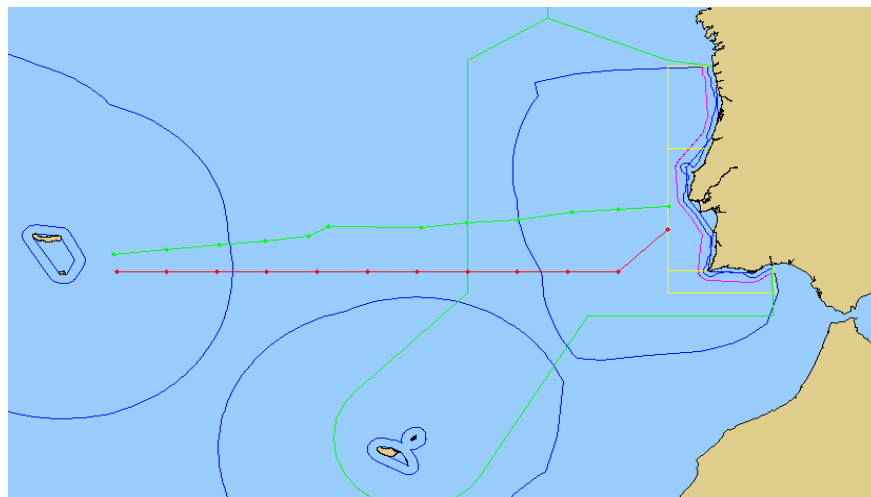
### Modelo: GFS

Tipo de derrota	Distancia percorrida	Número de vértices visitados	Combustível gasto	Piores condições meteorológicas	
				Vento	
<i>Derrota loxodrómica</i>	644.89	28	30270	9,353609	353,8627
<i>Derrota Ortodrómica</i>	644.84	28	28995	10,1095	14,66856
<i>Derrota Roteada</i>	652.20	28	28291	10,1095	14,66856

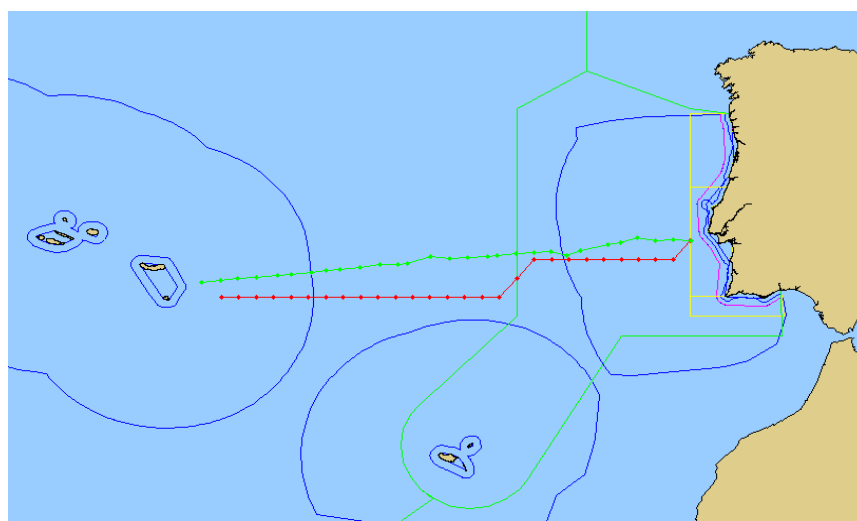
Com o recurso ao modelo GFS é possível verificar que a diferença entra consumos calculados não varia muito ao ser comparada com o modelo WW3. A principal diferença entre ambos os modelos encontra-se no tempo de cálculo e no facto do modelo GFS não considerar a agitação marítima como o modelo WW3. O modelo WW3 por outro lado, e devido à sua resolução, não permite muitas derrotas alternativas, sendo que em ambos os casos foi verificado que a derrota roteada é coincidente com a ortodromia.

Teste 7 – Simulação de uma viagem Ponta Delgada – BNL do NRP “Jacinto Cândido”

De modo a verificar se a derrota calculada é aproxima-se á derrota praticada pelo navio, neste último caso é simulado uma viagem entre Ponta Delgada e a BNL, sendo utilizados os ficheiros GRIB resultantes dos modelos WW3 e GFS obtidos no dia de início da viagem.



*Figura 57- Simulação de uma viagem Ponta Delgada – BNL do NRP “Jacinto Cândido”(WW3)*



*Figura 58 - Simulação de uma viagem Ponta Delgada – BNL do NRP “Jacinto Cândido”(GFS)*

Através da observação das Figura 57 e Figura 58 é possível verificar que ambas as derrotas calculadas se afastam inicialmente da derrota praticada pelo navio. É também visível que ambas as derrotas não são ótimas. No cálculo destas derrotas foram ainda obtidos os consumos de 22508 Lts de combustível no modelo WW3 e 21180 Lts no modelo GFS.



## 8. CONCLUSÃO

No capítulo da conclusão é resumido todo o processo da elaboração desta dissertação, assim como é sugerido alguns trabalhos no âmbito deste tema que poderiam dar continuidade á exploração deste tema.

### *8.1. CONCLUSÃO*

Com a análise destes testes é visível a complexidade da análise das derrotas, sendo que são várias as alterações de regime que não foram consideradas nos cálculos, estas alterações são uma fonte de erro tanto no cálculo na simulação das velocidades. Este erro é diluído através da utilização de dados com uma resolução maior.

De acordo com os resultados esperados foi verificado que a média das velocidades simuladas é superior que as velocidades registadas. Como foi anteriormente referido este facto deve-se á falta da componente da corrente no cálculo e as perdas de velocidade voluntárias.

Com a análise dos primeiros quatro testes é possível concluir que as velocidades simuladas são aproximadas das verdadeiras, pelo que é possível concluir que o perfil hidrodinâmico em pode ser aplicado em ambas as classes de navio.

No geral é possível concluir que o modelo GFS embora tenha uma resolução maior pelo que acaba por ter melhores resultados, demora demasiado tempo no cálculo das derrotas, por outro lado o modelo WW3 é mais rápido sem que haja uma diferença significativa no resultado final.

Através destes resultados é ainda possível concluir que o algoritmo escolhido não foi o melhor, pois este por vezes fornece derrotas que não são ótimas. Esta limitação é característica do algoritmo de Dijkstra, sendo que pode ser resolvida através da troca de algoritmo, um exemplo de um algoritmo que poderia melhorar os resultados é o algoritmo de Bellman.



Como resultado final deste trabalho é possível concluir, que este género de aplicações não consegue ter o mesmo nível de impacto nos navios da Marinha como para a navegação mercante, no entanto permite uma pequena contribuição para a melhoria da eficiência na sua gestão de recursos, comparando os possíveis ganhos com o investimento inicial. Estes ganhos vão sempre depender da utilização por parte das unidades da aplicação desenvolvida. A criação de um sistema de apoio à decisão com recurso ao algoritmo de Dijkstra para a otimização de derrotas vai auxiliar o navegador no planeamento das missões, mas nunca substituirá o seu trabalho, sendo que as bases do trabalho assentam em simplificações. A flexibilidade do navio é ligeiramente comprometida, ao ser necessário a passagem por vários pontos de modo a cumprir com a derrota calculada, por outro lado a aplicação com o recurso ao modelo WW3 permite o cálculo rápido de novas derrotas.

Em suma, no decorrer desta dissertação foi ainda possível responder as seguintes questões, sendo sumariamente obtidas as respetivas respostas:

- Será o combustível um fator problemático no orçamento da Marinha?  
Sim, foi verificado que no planeamento dos exercícios uma grande parte do orçamento é despendido em combustível,
- Existe algum serviço de roteamento passível de ser utilizado pela Marinha?  
Sim, na sua maioria são possíveis se serem aplicados ao caso específico da Marinha. Os optimizadores de derrota são aplicáveis em determinadas missões como as desempenhadas pelas fragatas e corvetas, enquanto os sistemas de monitorização da performance no navio podem ser aplicados a qualquer navio.
- Será a aplicação desenvolvida adaptável a qualquer navio?  
Não, a aplicação foi desenvolvida com base no perfil hidrodinâmico no NRP “Baptista de Andrade” pelo que foi demonstrado que é aplicável não só aos navios da mesma classe como aos navios da classe “João Coutinho”.
- Será a aplicação válida para o apoio á decisão?  
Sim, pois permite analisar várias alternativas. A derrota calculada embora possa não ser a derrota ótima, derivado da escolha do algoritmo, é ainda comparada com as restantes alternativas



- Serão os recursos disponibilizados suficientes?

Não, pois a modelação carece do estudo apropriado de modo a ser obtido um perfil hidrodinâmico mais exato e os dados obtidos através da SailDocs não têm ou a definição suficiente no caso do modelo WW3 ou os dados necessários no caso do modelo GFS.

- São compensados os investimentos da exploração dos serviços de roteamento?

Sim, pois algumas das missões praticadas pela Marinha têm as características necessárias para a aplicação destes serviços, contribuindo assim para o aumento na eficiência da gestão dos recursos.

## *8.2. TRABALHO FUTURO*

Nesta secção são propostos trabalhos futuros que permitam melhorar e complementar o estudo

O presente trabalho abre portas a diversos e interessantes trabalhos para o futuro. Com a realização deste trabalho Foi possível constatar que este tema tem margem de desenvolvimento, quer na parte da modelação, quer também seria uma forte aposta a criação de uma prática usual de informatização dos processos na Marinha Portuguesa, permitindo assim um aumento de eficiência e eficácia.

Como foi possível verificar durante o trabalho realizado existe bastante espaço para a evolução da modelação efetuada. De um modo geral poderia ser facilmente melhorado através de análises estruturais detalhadas e a realização de testes de mar adequados que permitissem a modelação de uma forma metódica e correta. Mesmo uma modelação através de *software* adequado poderia engrandecer o trabalho desenvolvido.

Também se deveria considerar a modelação de outros tipos de navio da Marinha, como foi anteriormente discutido esta solução seria passível de ser aplicada a outros navios. O custo da sua aplicação é relativamente baixo, comparando com os ganhos em termos de combustível e segurança.



De modo a permitir uma melhoria na qualidade da modelação poderia ser modelado o efeito da corrente.

Seria interessante o recorrer aos serviços das várias empresas quer no campo da modelação quer no campo da otimização de derrotas de modo a serem adquiridas novas metodologias de trabalho e desenvolvida uma nova mentalidade em relação a estes serviços.

Quanto a recolha de dados meteo-oceanográficas e de modo a rentabilizar os recursos na Marinha deveria de ser desenvolvido um protocolo com o IH que criasse facilidades de acesso a este género de dados, permitindo assim o desenvolvimento de outras aplicações do mesmo género.

De modo a melhorar a qualidade do cálculo das derrotas seria interessante a exploração de outros algoritmos, nomeadamente os algoritmos genéticos, permitindo assim o apoio em terra aos navios, através de um serviço de roteamento, á semelhança de outros serviços este poderia ser desempenhado por órgãos como o IH ou o IPMA.

Relativamente á elaboração do algoritmo de veria de serem criadas novas condições que permitissem um cálculo mais rápido. Um exemplo de uma condição que poderá melhorar o resultado é a limitação em direção das derrotas possíveis.



## 9. BIBLIOGRAFIA

- Aerospace & Marine International. (2011). *Services*. Retrieved agosto 14, 2013, from Aerospace & Marine International: <http://www.amiwx.com/services.html>
- Applied Weather Technology. (2013). *Solutions*. Retrieved agosto 14, 2013, from Website de Applied Weather Technology: <http://www.awtworldwide.com/solutions/>
- Bellman, R. E. (1952). *On the theory of dynamic programming*. National Academy of Sciences.
- Bellman, R. E. (1956). *On a routing problem*. Rand Corp Santa Monica CA.
- Benford, H. (1965). *Fundamentals of ship design economics*. Michigan, Estados Unidos da América: University of Michigan.
- Business Dictionary. (2013). *Optimization*. Retrieved agosto 15, 2013, from Website de Business Dictionary: <http://www.businessdictionary.com/definition/optimization.html>
- Canas, A. C. (2003). *Cartografia náutica portuguesa*. Retrieved agosto 8, 2013, from Web site do Instituto Camões: <http://cvc.instituto-camoes.pt/navegaport/b01.html>
- Comando Naval. (2011). *Directiva Sectorial do Comando Naval*. Lisboa: Marinha.
- Comissão Europeia. (2011). *EU Transport in Figures*. Retrieved agosto 08, 2013, from Website de Comissão Europeia: <http://ec.europa.eu/transport/facts-fundings/statistics/doc/2011/pocketbook2011.pdf>
- Couttie, B. (2010). *Chicago Express – Not Enough Handrails, Boxship Weather Performance Concerns*. Retrieved agosto 07, 2013, from Maritime Accident Casebook: <http://maritimeaccident.org/2010/02/chicago-express-not-enough-handrails-boxship-weather-performance-concerns/>
- D'Oliveira, R. S. (1964). *Elementos de Arquitectura Naval*. Lisboa: Serviço de publicações escolares.
- Escola Portuguesa de Pesca. (1989). *Caderno de Apontamentos de Cálculos Náuticos*. Lisboa: Secretaria de Estado das Pescas.





- Estado-Maior da Armada. (1998). *INA 2 - Disposições gerais e conceitos fundamentais da navegação*. Lisboa : Marinha Portuguesa.
- Estado-maior da Armada. (1998). *INA 4 -Condução da Navegação*. Lisboa: Marinha Portuguesa.
- Evangelos , F., Harilaos , N., & Nikolaos , M. (1992). *Quantitative methods in shipping: A survey of current use and future trends*. Athens University of economics and Business. Atenas: Athens University of economics and Business.
- Force Technology. (n.d.). *SeaPlanner – voyage planning and weather routing*. Retrieved agosto 2013, 2013, from Website de Force Technology:  
<http://www.forcetechnology.com/en/Menu/Products/Maritime-onboard-systems/>
- Gomes, F. (2001, março 10). Navio mercante encalha no Cabo Carvoeiro. *Oeste Online*. Retrieved Agosto 7, 2013, from  
<http://www.oesteonline.pt/noticias/noticia.asp?nid=804>
- Goodman, L., Lauschke, A., & Weisstein, E. (2013). *Dijkstra's Algorithm*. Retrieved agosto 11, 2013, from MathWorld--A Wolfram Web Resource.:  
<http://mathworld.wolfram.com/DijkstrasAlgorithm.html>
- Hagiwara , H., & Spaans, J. (1987). *Computation of optimum routes for ship weather routing*. Tokyo: International Symposium on Weather Routing.
- Harries, S. (1998). *Parametric Design and Hydrodynamic Optimization of Ship Hull Forms*. Berlim, Alemanha: Mensch-und-Buch-Verlag.
- Harries, S., & Lothar Birk. (2003). *OPTIMISTIC: Optimization in Marine Design*. Berlim, Alemanha: Mensch & Buch Verlag.
- Hinnenthal, J. (2008). *Robust Pareto – Optimum Routing of Ships utilizing Deterministic and Ensemble Weather Forecasts*. Tese de doutoramento, Universidade Tecnológica de Berlim, Berlim.
- Hung, L. K. (2013). *BonVoyage System Video*. Retrieved agosto 10, 2013, from Website de Applied Weather Technology: <http://www.awtworldwide.com/bvs.video/bvs.asp>



- IMO. (2001, março 8). *Incident Summary*. Retrieved Agosto 7, 2013, from GISIS: Marine Casualties and Incidents:  
<http://gisis.imo.org/Public/MCI/Browse.aspx?Form=Incident&Action=View&IncidentID=3428>
- IMO. (2008, setembro 24). *Incident Summary*. Retrieved Agosto 7, 2013, from GISIS: Marine Casualties and Incidents:  
<http://gisis.imo.org/Public/MCI/Browse.aspx?Form=Incident&Action=View&IncidentID=7636>
- Instituto Hidrográfico. (1989). *Manual de Navegação* (4ª edição ed.). Lisboa: Marinha.
- Integrated Climate Data Center. (n.d.). *Predictions of GFS*. Retrieved agosto 16, 2013, from Website de Integrated Climate Data Center:  
<https://icdc.zmaw.de/gfs.html?&L=1>
- Journée , J. (1976). *Prediction of Speed and Behaviour of a ship in a Seaway*. Delft Ship Hydromechanics Laboratory. Delft: Delft University of technology.
- Journé, J., & Meijers, J. (1980). *Ship Routeing for Optimum Performance*. Delft University of Technology, Ship Hydromechanics Laboratory . Delft: Delft University of Technology.
- Kotsch, W. J. (1983). *Weather for the Mariner*. Annapolis, Maryland: Naval Institute Press.
- MacSea Ltd. (2011). *Systems & Solutions*. Retrieved agosto 14, 2013, from Website de MacSea Ltd.: <http://macsea.com/systems-solutions/>
- Marine Modeling and Analysis Branch. (2013). *WAVEWATCH III® Model*. Retrieved julho 31, 2013, from Marine Modeling and Analysis Branch:  
<http://polar.ncep.noaa.gov/waves/wavewatch/wavewatch.shtml>
- Marinha Portuguesa. (1996). *ITIDINAV 802(A) - Critérios de estabilidade das UN's e UAM's da Marinha Portuguesa*. Lisboa: Marinha Portuguesa.
- Marinha Portuguesa. (2011). *Directiva de Politica Naval*. Lisboa: Marinha.
- Marinha Portuguesa. (n.d.). *PMA 2 - O navio*.



- Martins, P., Moura, A., Campos, A., & Lobo, V. (2010). *Genetic Algorithms approach for containerships fleet management dependent on Cargo and their deadlines*. Lisboa: International Association of Maritime Economist.
- Max Sea. (2013). *Products*. Retrieved agosto 14, 2013, from Website de Max Sea: <http://www.maxsea.com/products>
- Meijers, J. H. (1980). Some Economical Aspects of the Routeing of Ships. In J. Journée , & J. Meijers, *Ship Routeing for Optimum Performance* (pp. 12-21). Delft: Delft University of Technology.
- MetWorks. (2013). *Ship or Yacht Weather Routeing Services*. Retrieved agosto 15, 2013, from Website de MetWorks: <http://networksltd.com/>
- Montes, A. A. (2005). *Network shortest path application for optimum track ship routing*. Naval Postgraduate School. Estados Unidos: Naval Postgraduate School.
- National Imagery and Mapping Agency. (2002). Weather Routing - Principles of Weather Routing. In *The American Practical Navigator* (pp. 545 - 556). Maryland, Estados Unidos da America: National Imagery and Mapping Agency.
- National Weather Service Southern Region Headquarters. (2004). *Navy Operational Global Atmospheric Prediction System*. Retrieved julho 31, 2013, from National Weather Service Southern Region Headquarters: <http://www.srh.noaa.gov/ssd/nwpmmodel/html/nogover.htm>
- NCWCP. (2013). *The Global Forecast System (GFS) - Global Spectral Model (GSM)*. Retrieved julho 31, 2013, from NOAA Center for Weather and Climate Prediction: <http://www.emc.ncep.noaa.gov/GFS/doc.php>
- Nelder , J., & Mead, R. (1965). A Simplex Method for Function Minimization. *The Computer Journal*, pp. 308-313. Retrieved from <http://comjnl.oxfordjournals.org/content/7/4/308>
- NOAA. (2007). *The History of Numerical Weather Prediction*. Retrieved agosto 8, 2013, from Web site da NOAA: [http://celebrating200years.noaa.gov/foundations/numerical\\_wx\\_pred/#intro](http://celebrating200years.noaa.gov/foundations/numerical_wx_pred/#intro)



- Nowacki, H. (1970). *Department of Naval Architecture and Marine Engineering, University of Michigan*. Michigan, Estados Unidos da América: University of Michigan.
- NSR. (2013). *COAMPS Overview*. Retrieved julho 31, 2013, from Naval Research Laboratory, Monterey Marine Meteorology Division:  
<http://www.nrlmry.navy.mil/coamps-web/web/view>
- Oceanweather inc. (2013). *VOSS - Vessel optimization and Safety System*. Retrieved agosto 14, 2013, from Website de Oceanweather inc.:  
<http://www.oceanweather.com/forecast/VOSS/index.html>
- Predict Wind. (2013). *Why Predict Wind*. Retrieved agosto 18, 2013, from Website de Predict Wind: <http://www.predictwind.com/why-predictwind-forecast/>
- Rawson, K., & Tupper. (2001). *Basic Ship Theory* (5ª ed., Vol. II). Oxford, Inglaterra: Butterworth-Heinemann.
- Singleton, F. (s.d.). *SailDocs GRIB Service*. Retrieved julho 30, 2013, from Frank's Weather Site for Sailors: <http://weather.mailasail.com/Franks-Weather/Saildocs-Free-Grib-Files>
- Spaans, J., & Stoter, P. (2000). Shipboard Weather Routing. *Proceedings of the IAIN World Congress and the 56th Annual Meeting of The Institute of Navigation* (pp. 170-174). San Diego, Estados Unidos: Institute of Navigation.
- Timothy, A., & Kermit, S. (2005). *MATLAB® Primer* (7ª ed.). Washington, Estados Unidos da América: CHAPMAN & HALL/CRC.
- Weather News. (2013). *Virtual Tour*. Retrieved agosto 14, 2013, from Website de Weather News: <http://www.weathernews.com/#/contents/tour/>
- Weather Routing inc. (2013). *Oceans of experience*. Retrieved agosto 14, 2013, from Website de Weather Routing: <http://www.wriwx.com/cargo/home.php>
- Wei, S., & Zhou, P. (2011). Development of a 3D Dynamic Programming Method for Weather Routing. In A. Weintrit, & T. Neumann, *Methods and Algorithms in Navigation Marine Navigation and Safety of Sea Transportation* (pp. 181-182). Londres, Inglaterra: CRC Press.



WMO. (2013). *IMO: The Origin of WMO*. Retrieved agosto 8, 2013, from Website da WMO:

[https://www.wmo.int/pages/about/wmo50/e/wmo/history\\_pages/origin\\_e.html](https://www.wmo.int/pages/about/wmo50/e/wmo/history_pages/origin_e.html)

World Meteorological Organization. (2013, maio 3). *WMO No. 9 - Weather Reporting, volume D - Information for Shipping*. Retrieved agosto 8, 2013, from Website de World Meteorological Organization:

[http://www.wmo.int/pages/prog/www/ois/Operational\\_Information/VolD\\_en.html](http://www.wmo.int/pages/prog/www/ois/Operational_Information/VolD_en.html)



## ANEXOS







## ANEXO 2 - VELOCIDADES DOS VENTOS NOMINAIS

Categoria de Navio	Velocidade vento mínima para fins de projecto (nós)	Velocidade vento mínima para navios com pelo menos 5 anos em serviço (nós)
<b>A - OCEÂNICO</b>		
A.1. Navios que se espera sofrerem todos os efeitos directos de condições extremas (e.g. ciclones tropicais). Esta categoria inclui os navios que se deslocam integrados em forças anfíbias e de assalto	100	90
A.2. Navios que se espera evitarem os efeitos directos de condições extremas (e.g. ciclones tropicais).	80	70
<b>B - COSTEIRO</b>		
B.1. Navios que se espera sofrerem todos os efeitos directos de condições extremas (e.g. ciclones tropicais).	100	90
B.2. Navios que se espera evitarem os efeitos directos de condições extremas (e.g. ciclones tropicais). mas permanecerem no mar em todas os outros estados climatéricos.	80	70
B.3. Navios que abrigarão em portos ou fundeadouros protegidos caso se prevejam ventos superiores a Força 8. e embarcações portuárias	60	50
<b>C - PORTO</b>		
C.1. Todos os navios	60	50

Tabela 4.2. - Velocidades nominais do vento





## *Otimização das derrotas dos navios do tipo corveta*



## ANEXO 3 – DETERMINAÇÃO DO CENTRÓIDE DA ÁREA VÉLICA

NÃO CLASSIFICADO

ITDINAV 802

$$\left\{ \begin{array}{l} k = \frac{\sin \theta}{12} \left( 1 + \frac{\tan^2 \theta}{2} \right) \left( \frac{b}{h} \right) \cdot \cot \theta \geq \frac{b}{h} \\ k = \frac{\cos \theta}{8} \left( 1 + \frac{\tan \theta}{\frac{b}{h}} \right) - \frac{\cos \theta}{12 \left( \frac{b}{h} \right)^2} \left( 1 + \frac{\cot^2 \theta}{2} \right) \cdot \cot \theta \leq \frac{b}{h} \end{array} \right.$$

- Os tanques pequenos, que satisfaçam a condição

$$\frac{vb\gamma k \sqrt{\delta}}{\Delta_{\min}} < 0.01 m$$

onde

$\Delta_{\min}$  - é deslocamento mínimo do navio, em toneladas.

utilizando um valor de k correspondente a 30°, não deverão ser incluídos nos cálculos;

- O líquido residual nos tanques vazios não deverá ser contabilizado nos cálculos.

### 3.1.2. Determinação do centróide da área vélica

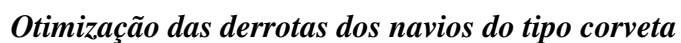
A determinação da posição vertical do centróide da área vélica do navio deverá ser efectuada de acordo com o seguinte procedimento:

- Considerar o perfil longitudinal do navio, da linha de flutuação (respeitante à condição de carregamento considerada) ao topo do mastro mais alto, dividindo-o em  $n$  faixas paralelas à linha de água com a altura de 1 metro (no caso de zonas de geometria substancialmente irregular, poder-se-á reduzir a altura destas faixas para 0.5 m, por forma a melhorar a precisão do cálculo);
- Determinar a área vélica de cada uma das  $n$  faixas do perfil longitudinal do navio,  $A_n$ ;
- Em termos práticos, a altura do centróide de cada faixa,  $z_n$ , deverá ser assumida como estando aproximadamente localizada a meia altura, salvo

NÃO CLASSIFICADO

3.2

ORIGINAL  
(Verso em branco)



ITDINAV 802

- A posição vertical do centróide da área vélica do navio,  $h_{AV}$ , é obtida através de

$$h_{AV} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i \cdot z_i}{\sum_{i=1}^n A_i}$$

$A_i$  - é a área de cada uma das faixas horizontais consideradas;

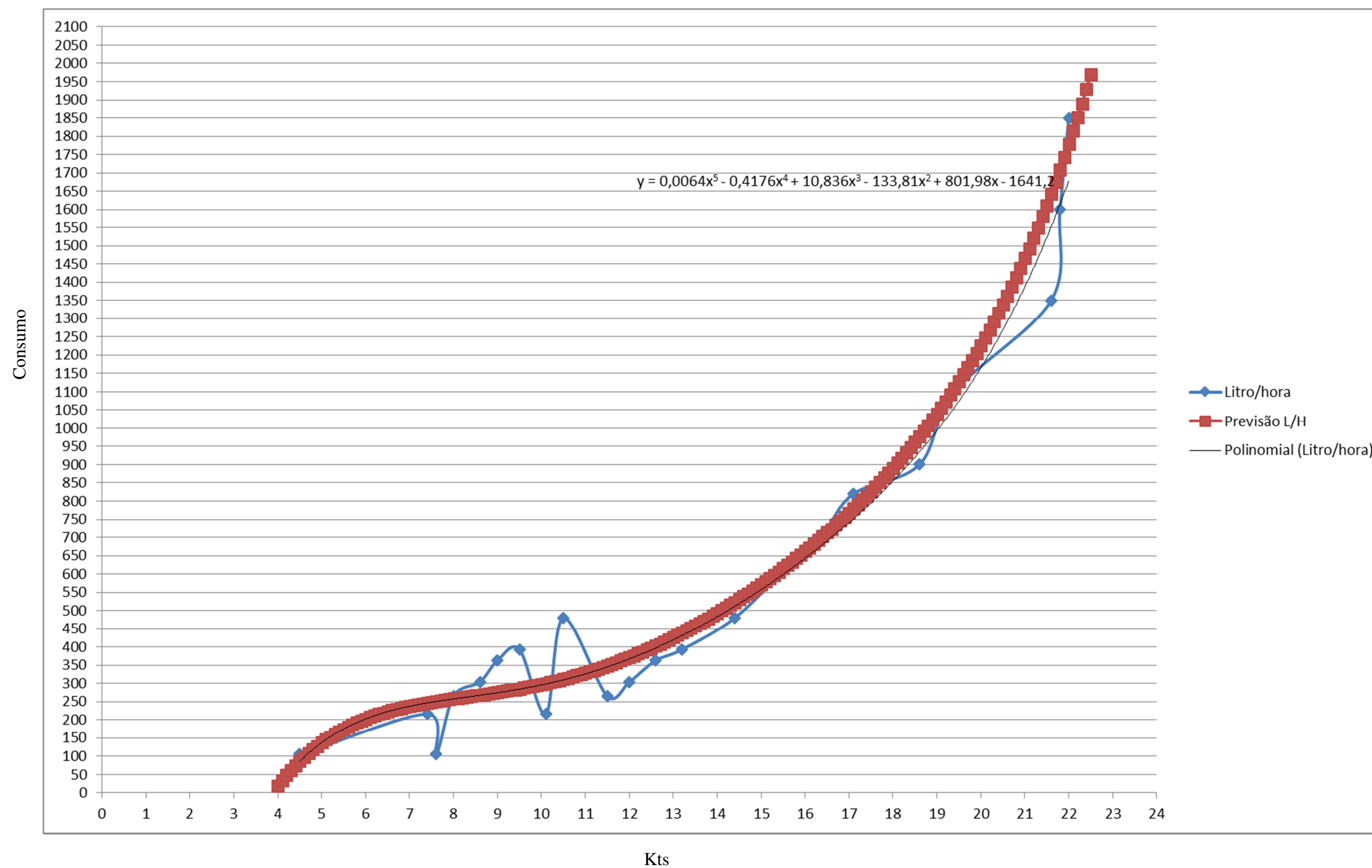
$z_i$  - é a altura acima do referencial considerado (usualmente a linha de água) de cada uma das faixas horizontais consideradas;

### 3.3

ORIGINAL  
(Verso em branco)




# ANEXO 4-GRÁFICO CONSUMO/VELOCIDADE DO NRP “BAPTISTA DE ANDRADE”






ANEXO 5-GRÁFICO CONSUMO/VELOCIDADE DO NRP “JACINTO CÂNDIDO”



# NRP JACINTO CÂNDIDO

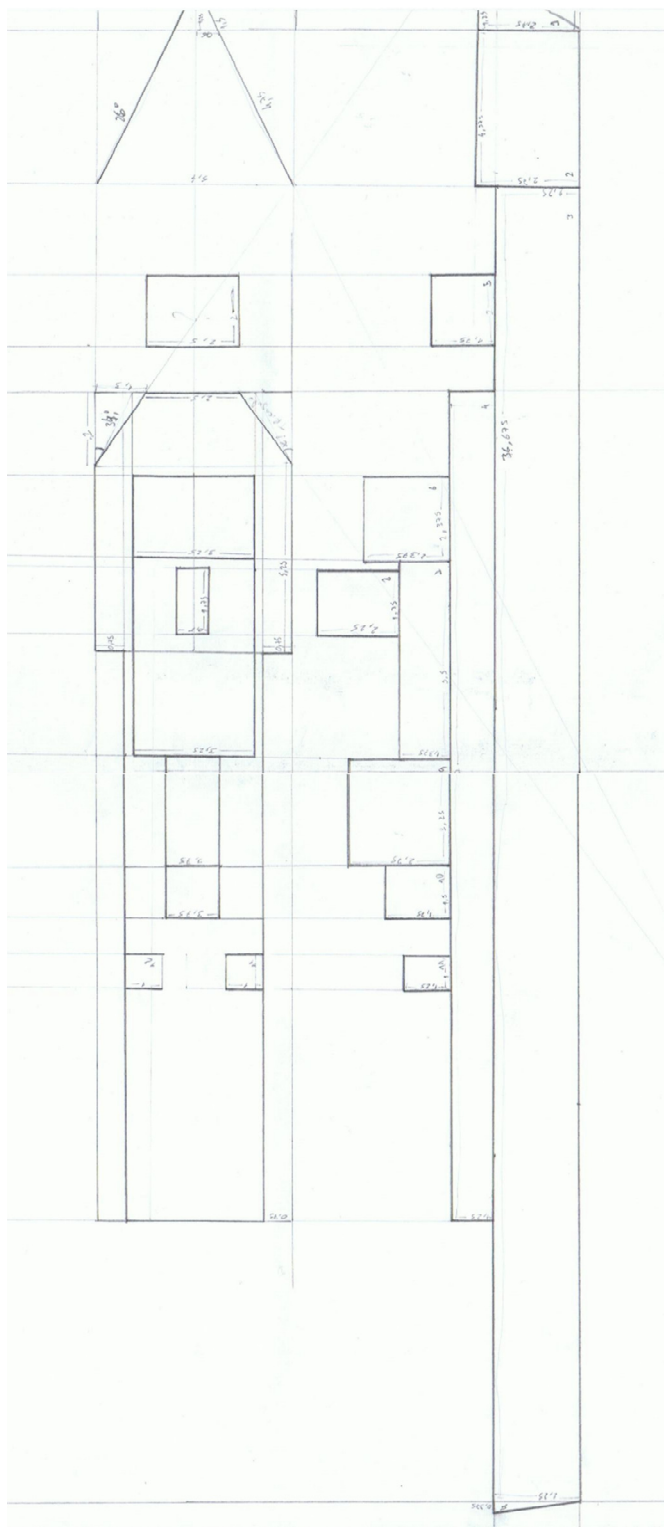


ROTAÇÕES	VELOCIDADE		TIPO	CONSUMOS MQ'S		CONSUMO GE'S			CALDEIRINHA	TOTAL (MÁX)	CONSUMOS MQ'S		CONSUMO GE'S			CALDEIRINHA	TOTAL (MÁX)	TOTAL (2MQ)
	1 MQ	2MQ		1 MQ	2MQ	1 GE	2 GE	3 GE			1 MQ	2MQ	1 GE	2 GE	3 GE			
	1 MQ	2MQ		L / h							L / 24h							L / Mi
AVDV	3,1	6,4	ROTAÇÕES DE FAINA	61	122	30	60	90	3	215	1464	2928	720	1440	2160	72	5160	33,59
AVMF	4,2	9,6		92	184	30	60	90	3	277	2208	4416	720	1440	2160	72	6648	28,85
AVTF	6,8	13,4		168	336	30	60	90	3	429	4032	8064	720	1440	2160	72	10296	32,01
200	6,8	13,4	SEM RESTRIÇÕES	168	336	30	60	90	3	429	4032	8064	720	1440	2160	72	10296	32,01
210	7,6	13,8		176	352	30	60	90	3	445	4224	8448	720	1440	2160	72	10680	32,25
220	8,8	14,1	ROTAÇÕES CRÍTICAS	204	408	30	60	90	3	501	4896	9792	720	1440	2160	72	12024	35,53
230	10,4	15		231	462	30	60	90	3	555	5544	11088	720	1440	2160	72	13320	37,00
240	11,5	15,1	SEM RESTRIÇÕES	243	486	30	60	90	3	579	5832	11664	720	1440	2160	72	13896	38,34
250	12,8	15,6	ROTAÇÕES CRÍTICAS	279	558	30	60	90	3	651	6696	13392	720	1440	2160	72	15624	41,73
260		16,4	SEM RESTRIÇÕES		642	30	60	90	3	735		15408	720	1440	2160	72	17640	44,82
270		17,1	ROTAÇÕES CRÍTICAS		711	30	60	90	3	804		17064	720	1440	2160	72	19296	47,02
280		17,8	SEM RESTRIÇÕES		754	30	60	90	3	847		18096	720	1440	2160	72	20328	47,58
290		18,2			812	30	60	90	3	905		19488	720	1440	2160	72	21720	49,73
300		18,5			848	30	60	90	3	941		20352	720	1440	2160	72	22584	50,86
320		19,2	REQUER CONCORDÂNCIA DO CHEVE SVC MECÂNICA		939	30	60	90	3	1032		22536	720	1440	2160	72	24768	53,75
340		20,5			1131	30	60	90	3	1224		27144	720	1440	2160	72	29376	59,71
360		21,6	REQUER CONCORDÂNCIA DO SR. COMANDANTE		1411	30	60	90	3	1504		33864	720	1440	2160	72	36096	69,63
380		22,1			1637	30	60	90	3	1730		39288	720	1440	2160	72	41520	78,28
400		22,9	SÓ EM TEMPO DE GUERRA		1912	30	60	90	3	2005		45888	720	1440	2160	72	48120	87,55



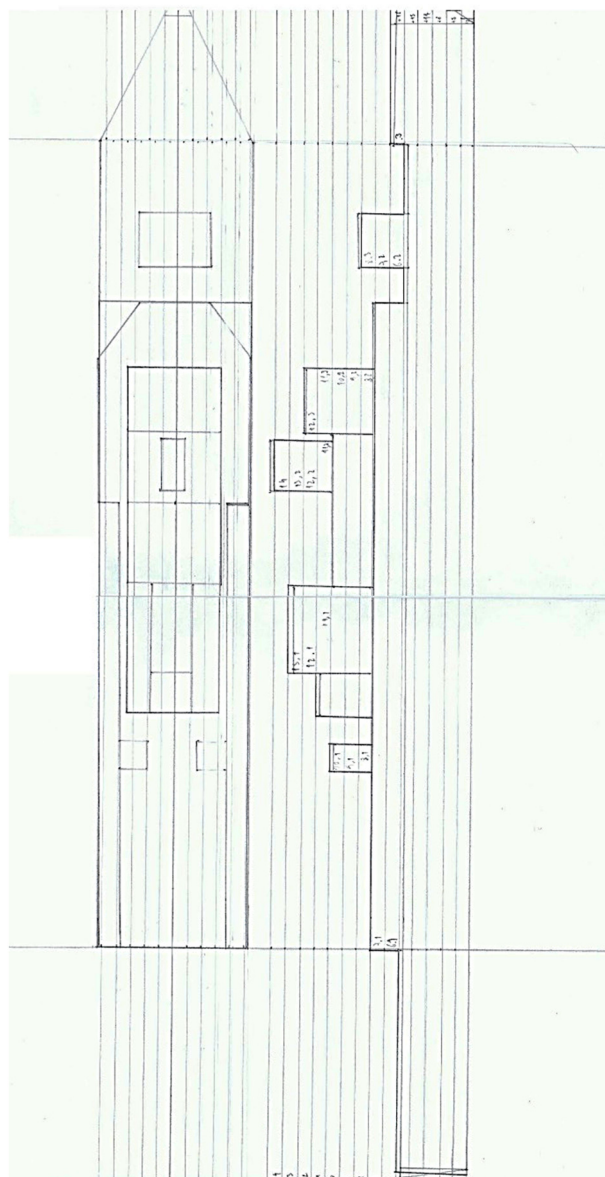
## APÊNDICES

## APÊNDICE 1- DESENHO DO NAVIO SIMPLIFICADO





## APÊNDICE 2-DESENHO DO NAVIO SIMPLIFICADO E DIVIDIDO EM FAIXAS LONGITUDINAIS





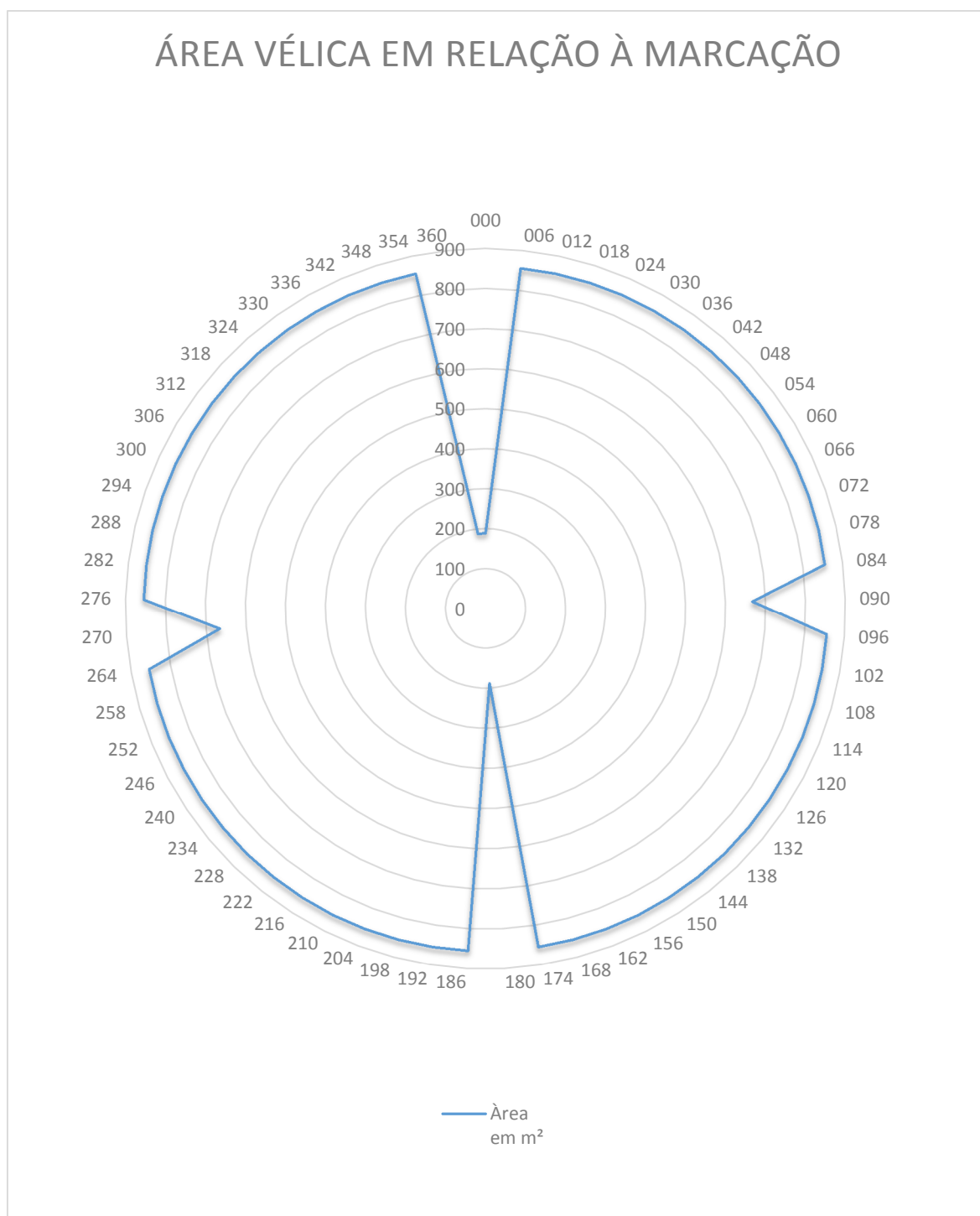


## APÊNDICE 3-TABELA RESUMO DO CÁLCULO DA ÀREA DAS FAIXAS DO DESENHO.

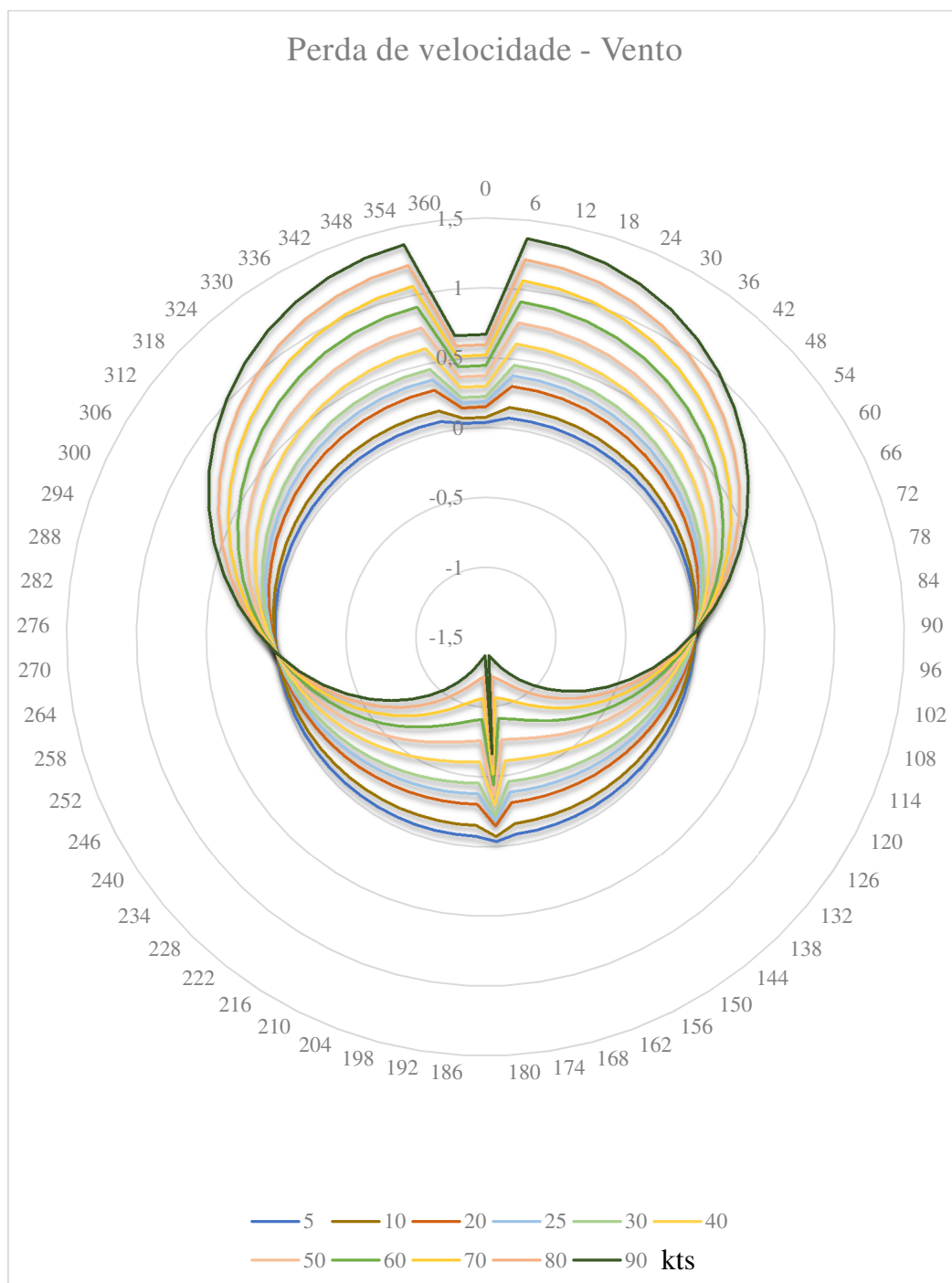
		Áreas		
Comprimento	Largura	Frontal	Lateral	Traseira
82,6	10,8	10,8	82,6	10,8
83,2	10,8	10,8	83,2	10,8
83,8	10,8	10,8	83,8	10,8
84,4	10,8	10,8	84,4	10,8
85	10,8	10,8	85	10,8
46,4	10,8	10,8	46,4	10,8
3,6	6	6	3,6	6
12	10,8	10,8	12	10,8
46,4	10,8	10,8	46,4	10,8
3,6	6	6	3,6	6
2	2	4	4	4
25	8	8	25	8
3,6	6	6	3,6	6
2	2	4	4	4
25	8	8	25	8
2	2	4	4	4
25	8	8	25	8
8,6	8	8	8,6	8
3,6	2	2	3,6	2
4,6	8	8	4,6	8
6,4	8	8	6,4	8
3,6	2	2	3,6	2
4,6	8	8	4,6	8
6,4	8	8	6,4	8
3,6	2	2	3,6	2
3,6	2	2	3,6	2
m	m	m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>



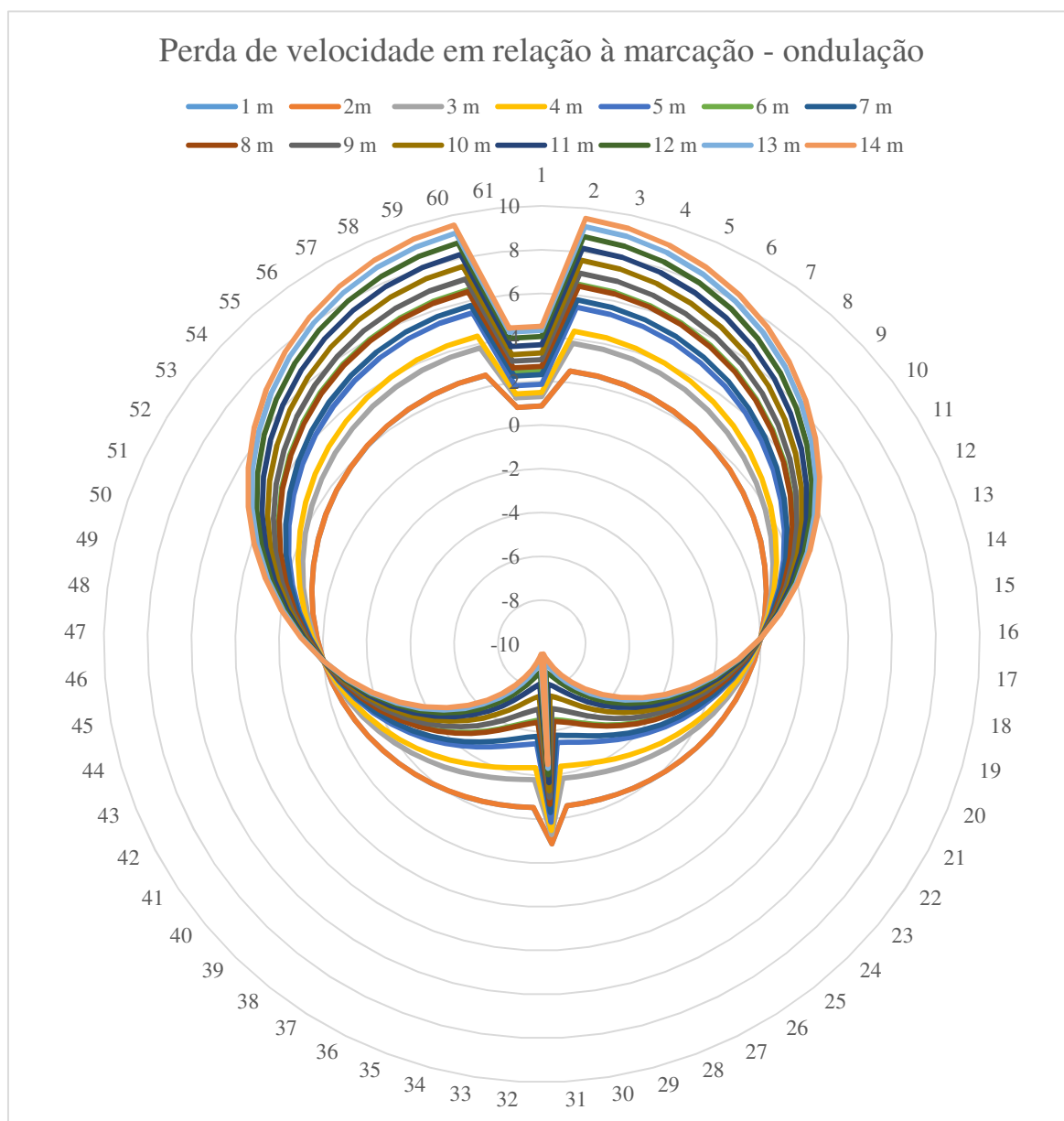
## APÊNDICE 4 - GRÁFICO ÁREA VÉLICA EM RELAÇÃO À MARCAÇÃO



## APÊNDICE 5 - GRÁFICO PERDA DE VELOCIDADE EM RELAÇÃO À MARCAÇÃO - VENTO



## APÊNDICE 6-GRÁFICO PERDA DE VELOCIDADE EM RELAÇÃO À MARCAÇÃO - ONDULAÇÃO



## APÊNDICE 7-ESQUEMA DOS PROCESSOS MAIS IMPORTANTES NA CONSTRUÇÃO DA VARIÁVEL “CUSTOS”

